Canada Centre for
Mineral and Energy Technology

Centre canadien de la technologie
des minéraux et de l'énergie

102-06078/

RÉTRO-ANALYSE DE L'ACTIVITÉ SÉISMIQUE DE LA ZONE M MINE SIGMA, VAL D'OR, QUÉBEC SEPTEMBRE 1994 - AOÛT 1995

JANVIER 1996

LABORATOIRES DES MINES ET DES SCIENCES MINÉRALES
M. Côté et M. Plouffe
Mine-laboratoire de Val d'Or

LABORATOIRES DES MINES ET DES SCIENCES MINÉRALES
RAPPORT DE DIVISION MRL95-141(TR)

CANMET

Rétro-analyse de l'activité séismique de la zone M, mine Sigma, Val d'Or, Québec Septembre 1994 - Août 1995

M. Côté[1] et M. Plouffe[2]

RÉSUMÉ

En 1994 commença l'enregistrement de l'activité séismique de la mine Sigma au moyen d'un système séismique centralisé. Au cours de la première année d'enregistrement de l'activité séismique, 699 événements séismiques ont été localisés pour l'ensemble de la mine Sigma. L'événement le plus important avait une valeur de magnitude de 3.5 m_N, le 16 juin 1995 à 15:59 H.A.E., et provenait du chantier 2502 EA, de la zone M. Ce dernier événement est, entre autre, la raison pourquoi cette zone a obtenu une attention spéciale méritant un rapport particulier car il est le plus important événement séismique généré à la mine Sigma depuis son ouverture.

La zone M génère une moyenne mensuelle de 30 événements séismiques, soit la moitié de l'activité séismique de l'ensemble de la mine Sigma. Cela est consistant avec le fait que la moitié du minerai extrait, de la région du puits #3, provenait des chantiers de la zone M, avec huit chantiers exploités au cours de la période. Cinq de ces chantiers montrent une affinité certaines entre l'exploitation et l'activité séismique de ceux-ci. Le chantier 2802 E2A, avec 129 événements séismiques, a été le plus séismiquement actif.

Sur 364 événements localisés dans la zone M, le quart avait une valeur de magnitude inférieure à -1.5 m_N et 127 événements avaient une valeur supérieure à 0.0 m_N. La libération de l'énergie séismique se distribua régulièrement au cours de l'année, avec 2 sauts importants, les 16 septembre 1994, 16 et 21 juin 1995, sauf pour les mois d'avril et mai 1995 où une inflexion est notée. La moitié des 22 événements les plus importants sont des coups de pilier. L'autre montre un mécanisme focal lié à un déplacement dû à une discontinuité. L'orientation des plans focaux montrent une bonne correspondance entre eux et les directions des contraintes principales.

Au cours de l'année, 4 séquences d'activité séismique importante ont eu lieu. Elles ont toujours correspondu avec un événement de valeur de magnitude important (> 1.5 m_N). Trois périodes d'inactivité séismique sont présentes dont une précédant de 8 jours les événements du 16 juin 1995. La séquence du 16 au 21 juin qui a débuté avec l'événement de magnitude 3.5 m_N semble avoir été précédée par deux précurseurs potentiels: l'éclatement des piliers des points de soutirage du niveau 24 et une période d'absence de l'activité séismique qui a duré 13 jours. L'événement de magnitude 3.5 m_N se produisit suite au sautage de la première volée long-trou dans un sous-niveau du chantier 2502 EA. Au cours des 48 heures suivant cet événement, une activité séismique importante se répercuta de haut en bas de la zone M, pour s'interrompre complètement le 18 juin. Le 21 juin, douze événements, dont un événement de magnitude 2.2 m_N, se produisirent de l'autre côté du travers-banc par rapport aux événements du 16-17 juin.

---

[1] Analyste séismique, Mine-laboratoire, Laboratoires de recherche minière, CANMET, Ressources naturelles Canada, Val d'Or, Québec.

[2] Chef de groupe en séismologie minière, Mine-laboratoire, Laboratoires de recherche minière, CANMET, Ressources naturelles Canada, Val d'Or, Québec.

Les événements séismiques qui se sont produits sur la zone M ne semblent pas suivre des tendances uniformes. Parfois, pour un chantier, l'activité séismique est étroitement liée au taux d'extraction du minerai, comme c'est le cas pour le chantier 2802 E2A. En d'autres endroits, le type de roche ainsi que la géologie structurale semblent plus contrôler l'état des contraintes. Certains chantiers semblent aussi relâcher ces contraintes de façon régulière et plus souvent (chantier 2802 E2A), alors qu'un chantier comme le 2502 E2A aurait plutôt tendance à accumuler plus de contraintes et à les relâcher plus violemment.

Back-analysis of the seismic activity of the M Zone, Sigma Mine, Val d'Or, Québec September 1994 - August 1995

M. Côté[1] and M. Plouffe[2]

SUMMARY

In 1994, a seismic system was commissioned at the Sigma Mine. During the first year, 699 seismic events were recorded. The largest event had a magnitude value of 3.5 m_N, and occurred in the 2502 EA stope, M Zone, on June 16, 1995, at 15:59 E.S.T. Being the largest seismic event ever at Sigma Mine, a report is thus specially dedicated to the seismic activity of the M Zone.

Monthly, 30 seismic events originate from the M Zone, about half of the seismic activity from the Sigma Mine. This is consistent with the fact that half of the ore produced between September 1994 and August 1995 comes from the 8 stopes in the M Zone. Five of these stopes show a real affinity between their seismic activity and their extraction. The 2802 E2A stope, with 129 seismic events, was the most seismically active stope during this period.

Of the 364 events located in the M Zone, 25% had a magnitude value below -1.5 m_N, while 127 events had a magnitude above 0.0 m_N. The liberation of the seismic energy was evenly distributed during the year, with important jumps on September 16, 1994, and June 16-21, 1995, except for April and May 1995, where an inflection is noted. Half of the largest seismic events show a pillar burst as the focal mecanism. The other half shows a fault-slip mecanism. The orientation of these focal planes shows a good trend between them and the direction of the main stresses.

Four important seismic sequences occurred during this period and always corresponded with major seismic events (> 1.5 m_N). Three periods showed no activity at all; one of them occurred only 8 days before the June 16 events. The June 16 to 21 sequence, which started with the 3.5 m_N event, seems to have been preceded by two precursors: the break-off of loading points pillars on the 24 level and a period of seismic inactivity of 13 days. The 3.5 m_N event occurred immediately after the first long-hole blast in a sub-level of the 2502 EA stope. Durig the following 48 hours, a intense seismic activity occurred in the whole M Zone to finish on June 18. On June 21, 12 events, of which one had a magnitude of 2.2 m_N, occurred on the other side of the cross-cut compared to the June 16 events, between the levels 24 and 25.

The seismic activity in the M Zone does not seem to follow the same trends. Sometimes, for a stope, the seismic activity is closely linked to the mining, like the 2802 E2A stope. Elsewhere, the type of rock and the structural geology seem to govern the stress regime. Some stopes seem to relax these stresses more regularly and more often (e.g. the 2802 E2A stope), while a stope like 2502 E2A, seems to accumulate these stresses and relax them more violently.

---

[1] Seismic analyst, Experimental Mine, Mining Research Laboratories, CANMET, Natural Resources Canada, Val d'Or, Québec.

[2] Group Leader in Mining Seismology, Experimental Mine, Mining Research Laboratories, CANMET, Natural Resources Canada, Val d'Or, Québec.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ i

SUMMARY iii

TABLE DES MATIÈRES iv

LISTE DES TABLEAUX vi

LISTE DES FIGURES vii

1. Introduction 1

2. Définitions 2

3. Description de la mine Sigma 3
   3.1. Bref historique et caractéristiques 3
   3.2. Environnement géologique 3
   3.3. Techniques minières 4
   3.4. Contrôle de terrain 4

4. Caractéristiques de la zone M 6

5. Système séismique et composantes 7
   5.1. Système d'acquisition des données 7
   5.2. Types de capteurs 8

6. Paramètres séismiques 10
   6.1. Signaux enregistrés 10
   6.2. Localisation des événements 11
   6.3. Magnitude des événements 12

7. Description de l'activité séismique de la zone M 13
   7.1. Distribution temporelle 13
      7.1.1. Distribution mensuelle 13
      7.1.3. Distribution horaire 15
   7.2. Distribution de l'activité séismique par chantiers exploités 19
   7.3. Description de la distribution de l'activité séismique 21

8. Magnitude, énergie et VMP 26
   8.1. Distribution de la magnitude 26
   8.2. Distribution de l'énergie séismique 27
   8.3. Distribution des vitesses maximales des particules 28

9. Analyse de la séquence du 16 au 21 juin 1995 30

10. Analyse des mécanismes au foyer 33
10.1. Théorie 33
10.2. Résultats 38

11. Conclusion 41

12. Remerciements 43

13. Références 44

APPENDICE A 46

APPENDICE B 55

APPENDICE C 70

APPENDICE D 79

LISTE DES TABLEAUX

1 - Distribution des chantiers selon leur séismicité 21
2 - Vitesses maximales des particules 29
3 - Vitesses empiriques maximales des particules 30
4 - Résumé de l'analyse des mécanismes au foyer 40

LISTE DES FIGURES

1 - Section transversale de la mine Sigma montrant la géologie et les principales veines minéralisées 5

2 - Exemple de bruit minier enregistré par les accéléromètres à la mine Sigma 9

3 - Exemple de sautage séquentiel enregistré par les géophones à la mine Sigma 9

4 - Exemple d'événement séismique enregistré par les accéléromètres à la mine Sigma 10

5 - Distribution mensuelle de l'activité séismique de la zone M 16

6 - Distribution mensuelle normalisée de l'activité séismique de la zone M 16

7 - Distributions mensuelles de l'activité séismique de la zone M et du taux de minage de ses chantiers exploités 17

8 - Distribution quotidienne de l'activité séismique de la zone M 17

9 - Fréquence journalière de l'activité séismique de la zone M 18

10 - Distribution horaire de la séismicité avec emphase sur les périodes de sautages 18

11 - Distribution des valeurs de magnitude 25

12 - Corrélation entre le nombre quotidien d'événements et la valeur de magnitude quotidienne maximale 25

13 - Corrélation entre le taux quotidien cumulatif de libération d'énergie séismique et le taux mensuel cumulatif d'extraction minière pour la zone M 28

14 - Représentation des six mécanismes possibles générant des événements séismiques dans un environnement minier 34

15 - Représentation de différents types de mécanismes au foyer 35

16 - Explications au sujet de la création d'une projection stéréographique 36

17 - Polarités des plans de faille des mécanismes au foyer étudiés 37

1. Introduction

La fréquence et l'ampleur des événements séismiques liés à l'activité minière ont tendance à s'accroître à mesure que le volume de roche soutiré et la profondeur de l'exploitation minière augmentent (Cook, 1963; Jaeger et Cook, 1971). Ce phénomène peut être expliqué par une augmentation des charges aux pourtours des excavations minières. Ces charges sont généralement le produit de la masse soutirée et de la profondeur de l'excavation. Les charges emmagasinées sous forme d'énergie de déformation, dans les roches compétentes, ne peuvent s'accumuler indéfiniment et doivent être relâchées par fermeture volumétrique violente (Cook, 1963).

Or, il a été observé que l'activité séismique de différentes mines de roches dures de l'Ontario et du Québec se produit à des profondeurs diverses. D'autres facteurs, telles la géologie et les contraintes tectoniques contemporaines, par exemple, doivent nécessairement avoir un rôle à jouer (Hedley, 1988).

On peut aussi constater que les mines les plus profondes situées dans des environnements géologiques complexes sont plus sujettes à générer des événements séismiques importants. Pour des raisons évidentes de sécurité et de planification, une bonne compréhension des causes de l'activité séismique et de ses effets devient nécessaire. La séismologie minière peut alors contribuer efficacement à cette caractérisation et aider à identifier le mécanisme des forces en jeux, et à déterminer le changement du champs de contraintes en place.

En exploitation sans interruption depuis 1937, la mine Sigma, Val d'Or, Québec, avec ses 40 niveaux répartis sur 5965 pieds[1] de profondeur et plus de 280 milles de galeries (incluant les monteries), entrecoupant une géologie structurale complexe de dykes, de zones de cisaillement et de failles, offre un véritable défi lorsque vient le temps de caractériser la mécanique des roches.

Depuis 1992, un programme de suivi de l'activité séismique est en marche (Côté et Plouffe,

[1] Comme le système de coordonnées et tous les travaux effectués à la mine Sigma se réfèrent au système impérial, celui-ci a été conservé dans ce rapport pour des besoins de compréhension.

1996) afin de déterminer la localisation et d'estimer l'importance de l'activité séismique. Suite à un événement séismique de magnitude 3.5 m_N, le 16 juin 1995, dans la zone M de la mine Sigma, une rétro-analyse de l'activité séismique associée de cette zone minéralisée "M" s'est avérée nécessaire afin de caractériser cette zone en fonction de son caractère séismique. Cette rétro-analyse couvre la période de septembre 1994 à août 1995, soit la première année au cours de laquelle l'activité séismique est suivie au moyen d'un système de surveillance centralisé (Côté et Plouffe, 1996).

Le présent rapport remplit une facette de la caractérisation de la zone M. Il fournit les renseignements disponibles concernant les caractéristiques de l'activité séismique de cette zone, par rapport à ses distributions spatiales et temporelles, ses relations avec l'exploitation minière des chantiers de la zone ainsi que les types de mécanismes qui ont généré les événements. D'autres études sur cette zone en géomécanique et en modélisation sont aussi en cours.

2. Définitions

Hedley (1992) a établi une distinction entre un événement séismique et un coup de toit. Les définitions suivantes sont employées dans le présent rapport.

> "Un événement séismique désigne un mouvement passager de terrain causé par une libération soudaine de l'énergie potentielle ou de l'énergie de déformation emmagasinée dans la roche. Par conséquent, l'énergie séismique rayonne sous forme d'ondes de déformation. La magnitude d'un événement séismique est généralement calculée à partir de l'amplitude maximale de l'onde de déformation, à l'aide d'une échelle logarithmique (p. ex. l'échelle de Richter)."
>
> "Un coup de toit désigne un événement séismique causant des blessures à des personnes ou des dégâts aux installations souterraines. La caractéristique générale et essentielle des coups de toit est leur nature soudaine et violente."

D'après ces deux définitions, il est clair que tous les coups de toit sont des événements séismiques, mais les événements séismiques ne sont pas tous des coups de toit. De plus, une chute de roche causée par gravité n'est pas un événement séismique. Dans ce rapport, nous ne parlerons que d'événements séismiques, laissant au personnel de la mine Sigma le soin de diffuser l'information et de publier, s'il y a lieu, les rapports de dommages ou d'incidents causés

par les événements séismiques produits à cette mine.

3. Description de la mine Sigma

3.1. Bref historique et caractéristiques

La mine Sigma, propriété de Placer Dome Canada limitée, est située à Val d'Or, dans le canton de Bourlamaque, comté d'Abitibi, dans le Nord-Ouest québécois (Les Mines Sigma (Québec) Limitée, 1992). Récemment, la production de la mine Sigma a atteint les 4 millions d'onces d'or.

Les chantiers de la mine Sigma sont répartis sur quarante niveaux, espacés d'environ 150 pieds. Les 24 premiers niveaux sont desservis par le puits #2 d'une profondeur de 3,317 pieds, partant de la surface. Le puits interne #3 atteint présentement une profondeur de 5,965 pieds et dessert les niveaux 24 à 40. La zone M est presqu'entièrement comprise dans la région desservie par le puits #3. Le système séismique, installé aussi entre ces derniers niveaux, a permis l'enregistrement des événements séismiques de la zone du puits #3, et en particulier ceux provenant de la zone M.

3.2. Environnement géologique

Le gisement de la mine Sigma se trouve à la base du Malartic inférieur (Robert et al., 1983). Trois types majeurs de roches sont présents: une bande de roches métavolcaniques, des diorites porphyriques et des dykes de porphyre feldspathique. La minéralisation se retrouve entre les zones de cisaillement "North Shear" et "South Shear", distantes d'environ 1500 pieds (450 m).

Le gisement est confiné aux veines de quartz-pyrite-tourmaline qui occupent les fractures et les zones de cisaillement. L'or qu'on y trouve est parfois lié à la pyrite. Le grand nombre de zones cisaillées et de dykes généralement orientés Est-Ouest, qui s'entrecroisent localement, expliquent en partie la complexité de la géologie (Figure 1).

Les veines minéralisées retrouvées dans cet ensemble géologique se divisent en trois classes: les

veines subverticales dans les zones de cisaillement ductile, les veines subhorizontales dans les fractures de tension, et les filonnets de dyke semblables aux veines subhorizontales mais confinés aux dykes de porphyre feldspathique (Lacroix et Harvey, 1993). Des dykes de diabase syngénétiques et subverticaux, orientés Nord-Sud, entrecoupent les formations.

3.3. Techniques minières

Le développement des travers-bancs et des galeries se fait à partir de volées de 8 pieds de longueur. Le forage et le sautage des monteries sont aussi réalisés par volées de 8 pieds. Tout le hâlage se fait sur rail.

Selon le pendage, la profondeur et la teneur des chantiers, le minerai est récupéré par différentes méthodes de minage: coupe-et-remblai, chambre-et-pilier, chantier d'emmagasinage et long-trou sont les plus communes.

Les chantiers coupe-et-remblai représente près de la moitié de la production de la mine Sigma (Lacroix et Harvey, 1993). Ils sont principalement présents dans la région du puits #3 où les contraintes sont les plus fortes. Les coupes sont horizontales et le minerai est soutiré par racloir dans des bures vers des conduits circulaires en acier distants de 100 pieds les uns des autres. Un sill de protection d'environ 30 pieds est laissé en haut des chantiers; il peut être récupéré par long-trou, à la fin du processus de minage.

3.4. Contrôle de terrain

Dans les chantiers exploités, les résidus du moulin sont utilisés comme remblai. Le remblai (35% d'eau) est coulé selon le besoin. L'eau s'écoule du chantier à l'aide de drains et par filtration à travers le résidu. Lorsque le remblai est complété, un plancher de béton de six pouces d'épaisseur est coulé pour permettre la circulation des équipements miniers et la reprise de l'exploitation, le plus tôt possible.

Figure 1
Coupe géologique (5250E)

Les autres techniques de soutènement sont:

- les boulons d'ancrage de 7.5 pieds suivant un patron de 3.5 pieds par 3.5 pieds;
- les câbles cimentés de 12, 15 et 20 pieds suivant un patron de 7 pieds par 7 pieds;
- les barres d'armature de 7.5 pieds suivant un patron de 3.5 pieds par 3.5 pieds;
- le grillage de 250 pieds carrés avec une maille de 2 pouces par 2 pouces.

4. Caractéristiques de la zone M

La zone M est une des veines subverticales situées dans les zones de cisaillement, une des classes de veines minéralisées listées dans la section précédente. Elle est orientée Est-Ouest et a un pendage moyen de 70° vers le Sud. Elle est située approximativement entre les niveaux 22 et 32 et entre les sections 4500E et 6500E (Labrie, 1994). Sa largeur moyenne varie de six à quinze pieds, tandis que sa dimension latérale dépasse les 1500 pieds. Cette zone de cisaillement se divise parfois sur son extension latérale. Elle forme ainsi deux autres zones, M-Nord et M-Branche, très proche de la zone M. En Appendice B, on retrouve des sections longitudinales montrant les différents chantiers de la zone M.

Ces chantiers sont principalement exploités par la méthode coupe-et-remblai. Ils ont un pendage moyen de 70° et ont une largeur moyenne de 8 à 12 pieds. Au cours de la période étudiée, huit chantiers étaient en exploitation. Leurs taux d'extraction sont montrés en Appendice C. Les mêmes techniques de soutènement et de contrôle de terrain nommées à la Section 3.4 sont employées à la zone M.

Un levé géomécanique (Labrie, 1994) a permis de diviser la zone M en trois grands secteurs de comportement: le secteur Est où se retrouve principalement la minéralisation; le secteur Centre où se retrouvent les travers-bancs; et le secteur Ouest peu exploité. Les indices de qualité et les conditions de terrain du massif rocheux vont croissants vers l'ouest; par exemple, l'indice Q qui passe de 2, puis 4 et 10 pour les secteurs Est, Centre et Ouest, respectivement.

Des essais de laboratoire ont permis de déterminer une résistance moyenne de compression uniaxiale de l'ordre de 148.4, 183.6 et 97.7 MPa pour les trois principales formations rocheuses de la zone M (diorite des épontes, dyke porphyrique feldspathique et veine minéralisée) (Labrie, 1994). Les modules de déformation élastique - module de Young et coefficient de Poisson -

seraient de l'ordre de 70, 82.5 et 56 GPa et de 0.27, 0.26 et 0.16 pour les deux paramètres et les trois formations rocheuses respectivement. Cela signifie que la veine minéralisée est plus déformable que les dykes et les épontes.

Des résultats obtenus d'une autre zone minéralisée mais déterminés à un niveau similaire au centre de la zone M montrent que les contraintes *in situ* auxquelles sont soumises les formations de la zone M sont importantes (Arjang, 1994). Les contraintes principales de compression, σ_1 et σ_2, sont subhorizontales et de magnitude 54.8 et 36.8 MPa, respectivement. La contrainte principale maximale, σ_1, est perpendiculaire aux zones minéralisées et aux autres structures géologiques, tandis que σ_3 est parallèle. La contrainte verticale moyenne, σ_v, est de l'ordre de 29.2 MPa, proche de la valeur de la contrainte statique verticale.

5. Système séismique et composantes

L'installation d'un système séismique centralisé en septembre 1994, couplé d'un logiciel de localisation automatique des événements séismiques, a permis l'enregistrement de 778 événements séismiques durant les douze premiers mois de surveillance (Côté et Plouffe, 1996). De ce nombre, 699 ont été localisés à l'intérieur ou près des limites de la mine. Il y a eu 364 événements séismiques qui ont été localisés sur la zone M.

Une description plus détaillée du système séismique se retrouve dans Côté et Plouffe (1996). Les principales composantes du système séismique centralisé sont le système d'acquisition des données, les capteurs ainsi que les câbles électriques nécessaires à la transmission des signaux.

Le poste de contrôle est localisé dans le bureau des capitaines au niveau 24. Un câble situé dans dans le puits #3 permet la transmission des signaux des 30 canaux d'enregistrement à l'ordinateur d'acquisition des données. Un câble téléphonique permet de relier le centre à la surface.

5.1. Système d'acquisition des données

Le système d'acquisition des données est composé essentiellement d'un mécanisme de

déclenchement, d'un convertisseur de signaux A/D, d'un micro-ordinateur et d'un logiciel d'acquisition des données. Le logiciel et le mécanisme de déclenchement ont été développés par CANMET pour répondre spécifiquement aux besoins en séismologie des mines canadiennes.

De plus, un logiciel de localisation automatique a été installé. Ce logiciel détermine les temps d'arrivée des ondes P sur tous les canaux d'enregistrement des événements considérés comme valables et les localisent au moyen d'une routine développée par le personnel du CANMET (Ge et Mottahed, 1993). Les coordonnées trouvées sont ensuite accessibles au personnel de la mine Sigma, sur l'écran du micro-ordinateur du niveau 24 ou, moyennant accès par modems, à l'ingénierie, au département de production et à la Mine-laboratoire du CANMET.

5.2. Types de capteurs

Un total de 20 capteurs a été installé pour couvrir l'ensemble des régions situées entre les niveaux 24 et 40 de la mine. De ce nombre, 5 capteurs sont des géophones triaxiaux et 15 des accéléromètres uniaxiaux pour un total de 30 canaux de transmission de signaux.

Les capteurs triaxiaux sont des géophones, modèle 1130GS, manufacturés par Electro-Lab, Spokane, Washington. Ils sont munis d'un amplificateur programmable avec amplification variable de 0 à 60. Les capteurs triaxiaux sont installés sur les niveaux 24, 29, 30 et 38. Les capteurs triaxiaux sont principalement utilisés pour le calcul des valeurs de magnitude et des autres paramètres séismiques.

Les capteurs uniaxiaux sont des accéléromètres, modèle 271, manufacturés par Electro-Lab. Les capteurs uniaxiaux sont principalement conçus pour l'enregistrement des temps d'arrivée des ondes pour la localisation des événements, ainsi que de la polarité de la première arrivée pour l'étude des mécanismes de rupture. Ces capteurs uniaxiaux sont installés aux niveaux 26, 29, 32, 33, 36, 37 et 40.

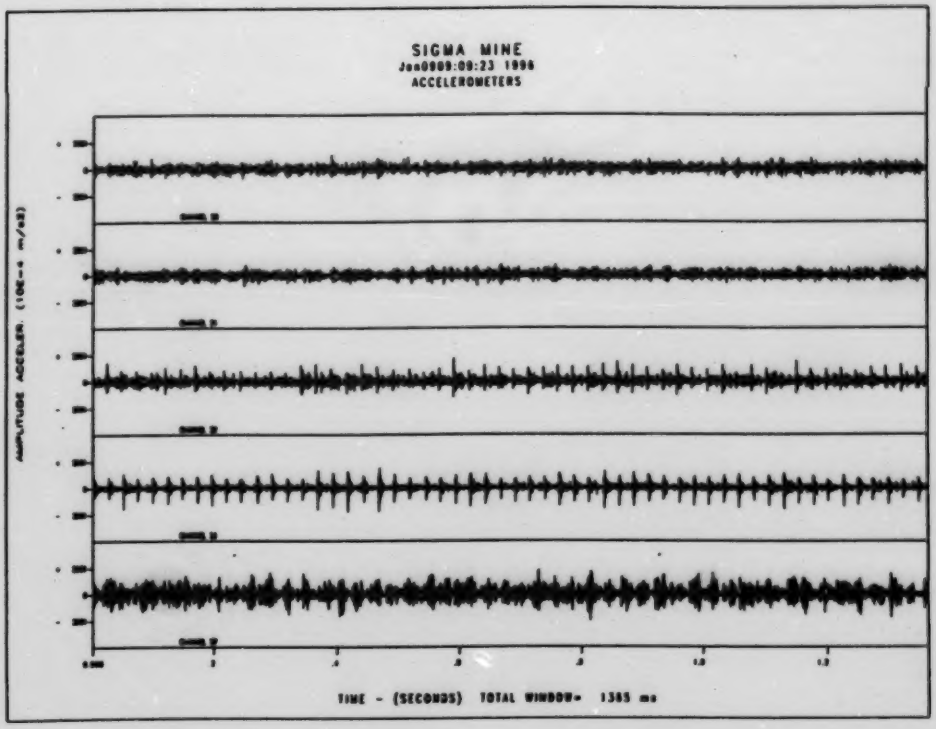


Figure 2 - Exemple de bruit minier enregistré par les accéléromètres à la mine Sigma

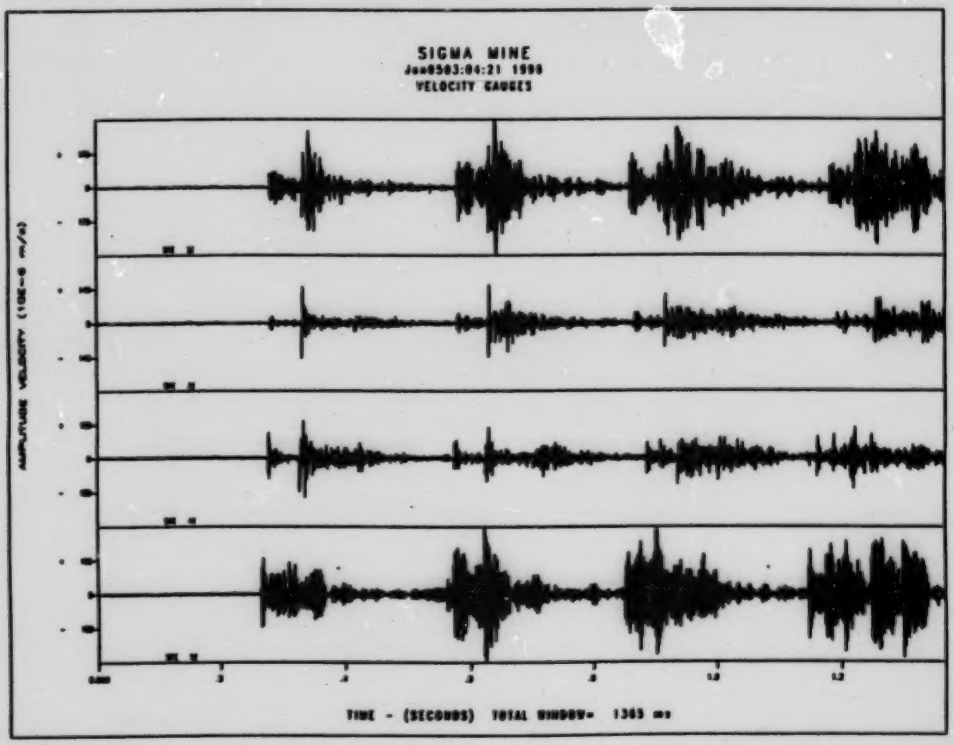


Figure 3- Exemple de sautage séquentiel enregistré par les géophones à la mine Sigma

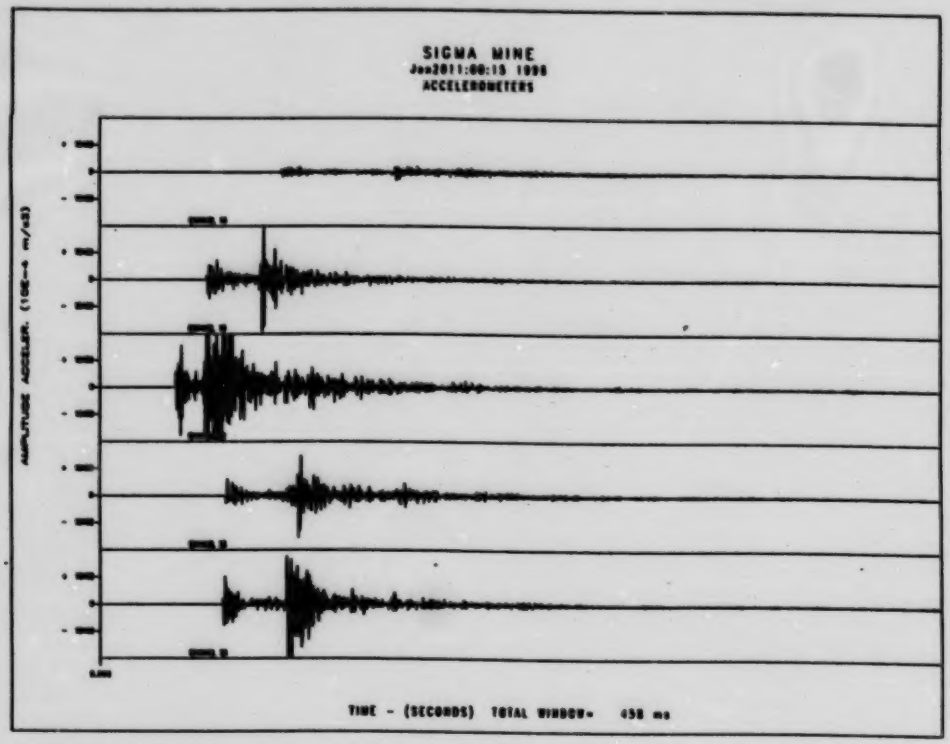


Figure 4- Exemple d'événement séismique enregistré par les accéléromètres à la mine Sigma

6. Paramètres séismiques[2]

6.1. Signaux enregistrés

Les signaux enregistrés par les séismographes peuvent être classifiés en trois catégories: les bruits miniers, les sautages séquentiels et les événements séismiques.

Les bruits miniers sont les vibrations créées par les équipements miniers lourds, le courant électrique ou les êtres humains (Figure 2). Ces événements, lorsqu'ils n'ont pas été filtrés par le mécanisme de déclenchement, sont facilement reconnaissables grâce au logiciel d'analyse des ondes. Un autre type d'ondes enregistrées facilement reconnaissable sont les sautages séquentiels

[2] Une description plus complète de la détermination des différents paramètres séismiques se retrouve dans Côté et Plouffe (1996).

du fait des nombreux tirs visibles ou délais dans la fenêtre d'enregistrement (Figure 3). Les événements séismiques comprennent tous les événements qui ne sont pas confirmés par le personnel en dehors des 2 catégories ci-haut mentionnées. La Figure 4 montre la signature des ondes d'un événement séismique enregistré par les accéléromètres du système séismique.

6.2. Localisation des événements

Avec la synchronisation de tous les capteurs au moyen de l'ordinateur d'acquisition des données, la localisation des événements séismiques[3] est déterminée au moyen des temps d'arrivée absolus des ondes séismiques, généralement les temps d'arrivée de l'onde P (primaire ou de compression). La distance entre l'événement a été évaluée en tenant compte des temps d'arrivée des ondes séismiques selon l'équation:

$$d\ (pi) = 20\ 000\ (pi/s) * \Delta T\ (s) \qquad (1)$$

La valeur de 20 000 pi/s est la vitesse séismique moyenne des ondes primaires pour la lithologie présente à la mine Sigma. Cette valeur fut vérifiée en localisant des sautages dont la localisation était connue. L'erreur maximale obtenue sur cette localisation est de 20 pieds (6 mètres).

A partir de cette vitesse, une routine développée par le U.S. Bureau of Mines (Leighton et Duvall, 1972) est utilisée afin de déterminer les localisations des événements séismiques depuis septembre 1994.

Vu la grandeur de couverture du réseau et le nombre de stations, seules les localisations situées à l'intérieur du réseau doivent être considérées comme valables. Ces localisations devraient avoir une erreur de l'ordre de 20 pieds, comme pour le sautage de calibration précédemment mentionné. La précision des localisations à l'extérieur du réseau devrait être d'au moins 15% de la distance entre la source et le capteur le plus près. Toutefois, les localisations calculées aux niveaux 22 et 23 devraient se situer entre ces extrêmes. Ceci est valable pour tous les événements enregistrés provenant de la zone M.

---

[3] Le processus de localisation automatique est décrit dans Ge et Mottahed (1993).

6.3. Magnitude des événements

Les valeurs de magnitude des événements localisés, retrouvées en Appendice A, ont été obtenues au moyen d'une relation empirique entre la magnitude et l'énergie séismique dégagée par l'événement. Cette relation, développée pour les mines de roches dures de l'Ontario, est utilisée pour toutes les mines où CANMET a installé un de ses systèmes séismiques (Hedley, 1992).

La relation s'exprime sous la forme:

$$\log(W_k) = 1.3 m_N - 1.75 \qquad (2)$$

où W_k représente la somme des valeurs de l'énergie séismique, en mégajoules, divisée par le nombre de capteurs triaxiaux ayant enregistré l'événement, et m_N, la valeur de magnitude. Ces résultats empiriques peuvent jouer de ± 0.3 m_N avec les valeurs obtenues au moyen du Réseau séismographique national, pour les événements les plus importants. La plus petite valeur calculable au moyen de cette relation semble être, pour la mine Sigma, de -1.5 m_N. Cela provient du fait de la combinaison de géophones et d'accéléromètres; ces derniers permettent d'enregistrer des événements de plus petites valeurs de magnitude en raison de leur sensibilité plus élevée.

La magnitude est donnée selon l'échelle de Nuttli, valable pour l'Est de l'Amérique du Nord (Nuttli, 1973) et employée pour calculer les valeurs de magnitude des tremblements de terre de cette même région par la Commission géologique du Canada. Cette échelle diffère légèrement de celle, plus connue, de Richter (Gutenberg et Richter, 1956) qui n'est valable que pour l'Ouest de l'Amérique du Nord, à l'ouest de la Cordillère. En moyenne, l'échelle de Nuttli donne des valeurs de 0.3 à 0.6 unités plus élevées par rapport à celle de Richter, lorsque les valeurs de magnitude sont supérieures à 2.0 (Ebel, 1982; Hasegawa, 1983; Boore et Atkinson, 1987); aucune comparaison n'existe pour des valeurs de magnitude plus petites.

6.4. Vitesse maximale des particules (VMP)

Les signaux enregistrés ont aussi permis de calculer, pour chaque événement, la vitesse maximale des particules (VMP), plus familièrement connue sous son acronyme anglais, PPV (pour *peak particle velocity*). Ces valeurs représentent les vitesses de déplacement des sites où un capteur triaxial est installé lorsque ces sites subissent l'influence des ondes séismiques. Comme le système séismique possède des capteurs triaxiaux, cette VMP est la valeur maximale de la somme vectorielle des ondes enregistrées par chacun des trois axes d'enregistrement de ces capteurs.

Cette VMP est utilisée dans des études de sautages et de coups de toit afin d'évaluer les dégats causés dans les mines.

7. Description de l'activité séismique de la zone M

Pour étudier l'activité séismique de la zone M, nos observations ont été divisées, afin d'être en mesure d'évaluer et de comprendre les comportements séismiques propres à cette zone. Une distribution temporelle nous permet de voir l'évolution chronologique de l'activité séismique selon différents facteurs. Des distributions de l'activité séismique ont été faites selon les mois, les jours ainsi que selon les heures des quarts de travail et de sautage. De plus, la distribution spatiale des événements nous permet de constater la réponse des chantiers ou de certaines parties de la zone suite aux changements apportés au massif rocheux.

7.1. Distribution temporelle

Ce genre de distribution dans le temps a été effectué dans le but de voir le comportement à court, moyen et long terme de l'activité séismique sur la zone M.

7.1.1. Distribution mensuelle

Le nombre mensuel d'événements pour la zone M ainsi que pour l'ensemble de la mine, entre septembre 1994 et août 1995, sont présentés à la Figure 5. La Figure 6 présente, elle aussi, cette

distribution, mais normalisée en pourcentage du nombre d'événements. On remarque aisément qu'environ 50% de l'activité séismique de la région du puits #3 de la mine Sigma se produit sur la zone M. Cela est consistant avec le fait que près de la moitié du minerai extrait des chantiers du puits #3 provenait de la zone M, pour la période couverte par ce rapport. On note sur la Figure 7 que le minerai extrait des chantiers de la zone M avait une moyenne mensuelle de 6060 tonnes pour les mois de septembre 1994 à juin 1995, puis une moyenne de 3100 tonnes pour les mois de juillet et août 1995, suite à l'événement de magnitude 3.5 m_N qui a entraîné la fermeture de chantiers de la zone M. La valeur mensuelle moyenne des tonnes soutirées pour l'ensemble du puits #3 est de 11000 tonnes (Côté et Plouffe, 1996).

La zone M a généré une moyenne mensuelle de 30 événements. Ces données révèlent certains mois où l'activité séismique de la zone M est plus importante, soient les mois de septembre et novembre 1994, et les mois de janvier, juin et août 1995, avec respectivement 31, 55, 37, 50 et 38 événements enregistrés. Ce sont également ces mêmes mois où l'activité séismique de la zone M est supérieure à 50% de l'activité totale (Figure 6).

Pour ces cinq mois mentionnés plus haut, les chantiers les plus actifs ont été le chantier 2802 E2A pour les trois premiers mois cités, les chantiers 2502 EA et 2502 WC pour le mois de juin 1995 et finalement, les chantiers 3102 W2A et 3202 WA pour le mois d'août 1995. Cette distribution spatiale des événements est représentée sur les sections de l'Appendice B.

7.1.2 Distribution quotidienne

La distribution des événements séismiques de la zone M pour chaque jour d'enregistrement a été compilée à la Figure 8. Des périodes d'activité séismique plus importante se démarquent, ainsi que des périodes de faible activité. À ces périodes de forte activité séismique, neuf événements et plus, correspond toujours un événement de magnitude supérieure à 1.5 m_N. De plus, trois périodes d'inactivité sont visibles.

Ces périodes d'inactivité se sont produites entre les 28 septembre et 11 octobre 1994, les 30 novembre et 16 décembre 1994 et les 26 mai au 8 juin 1995. Les deux premières périodes ont suivi un événement séismique important de magnitude 2.4 et 1.6 m_N, à un intervalle de 12 et 9

jours respectivement. La fin de la troisième période a précédé de 8 jours la séquence au cours de laquelle s'est produit un événement de magnitude 3.5 m_N.

Côté et Plouffe (1996) ont trouvé 9 séquences d'activité séismique importante au cours de la même période pour l'ensemble de la région du puits #3. Le tiers de ces séquences provenait de la zone M. Ces séquences sont les 14-16 septembre et 21 novembre 1994, et les 16-21 juin 1995.

À la mine Sigma, les sautages s'effectuent généralement du lundi au vendredi avec, parfois, certains sautages les fins de semaine. Si on compile le nombre d'événements en fonction des jours de la semaine (Figure 9), on remarque qu'en début de semaine, soit du dimanche au mardi, l'activité séismique est plus faible. À partir du mercredi, il y a une augmentation sensible de l'activité séismique jusqu'au samedi. L'importance de l'activité séismique le samedi peut s'expliquer par le fait que certains sautages importants de chantiers long-trou ont lieu le vendredi soir. L'effet des changements des contraintes peut se répercuter pendant les 24 heures suivants ces sautages.

7.1.3. Distribution horaire

La Figure 10 montre l'activité séismique enregistrée sur la zone M selon une distribution horaire. La compilation s'est faite pour chaque heure, sauf pour deux périodes couvrant les heures habituelles où sont généralement effectués les sautages de production, soit entre 02:00 et 04:00 et entre 15:00 et 17:00. Pour ces deux dernières périodes, la compilation s'est faite aux quinze minutes. Les heures habituelles de sautages sont vers 02:45 et 15:45.

Il y a des périodes particulières où l'activité séismique est plus importante. Ces périodes sont de:

- 00:00 à 02:00 heure;
- 02:45 à 03:30 heure;
- 04:00 à 05:00 heure;
- 11:00 à 13:00 heure;
- 15:45 à 16:30 heure;
- 17:00 à 18:00 heure.

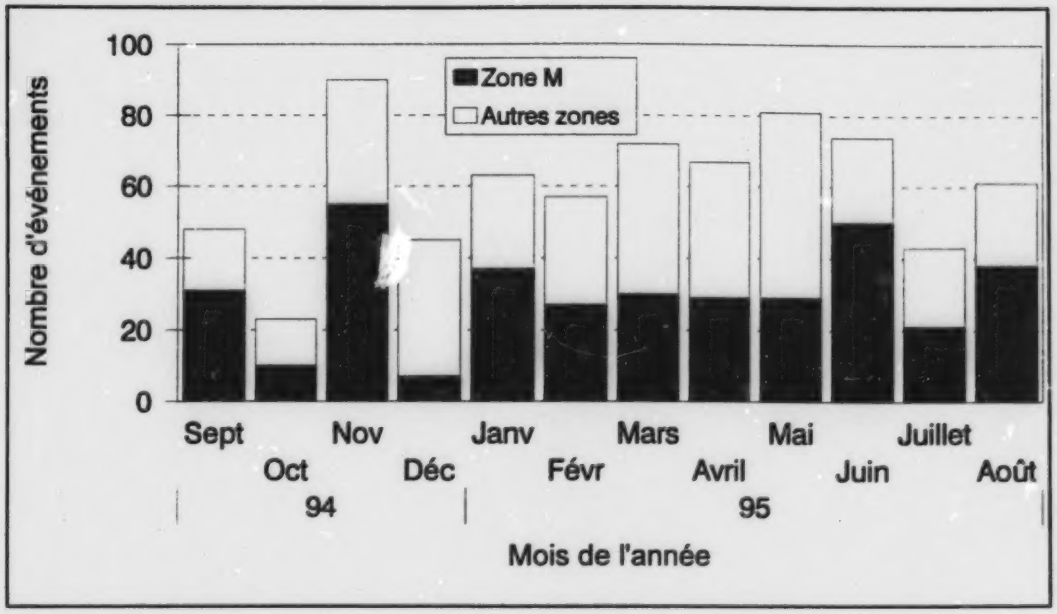


Figure 5 - Distribution mensuelle de l'activité séismique de la zone M

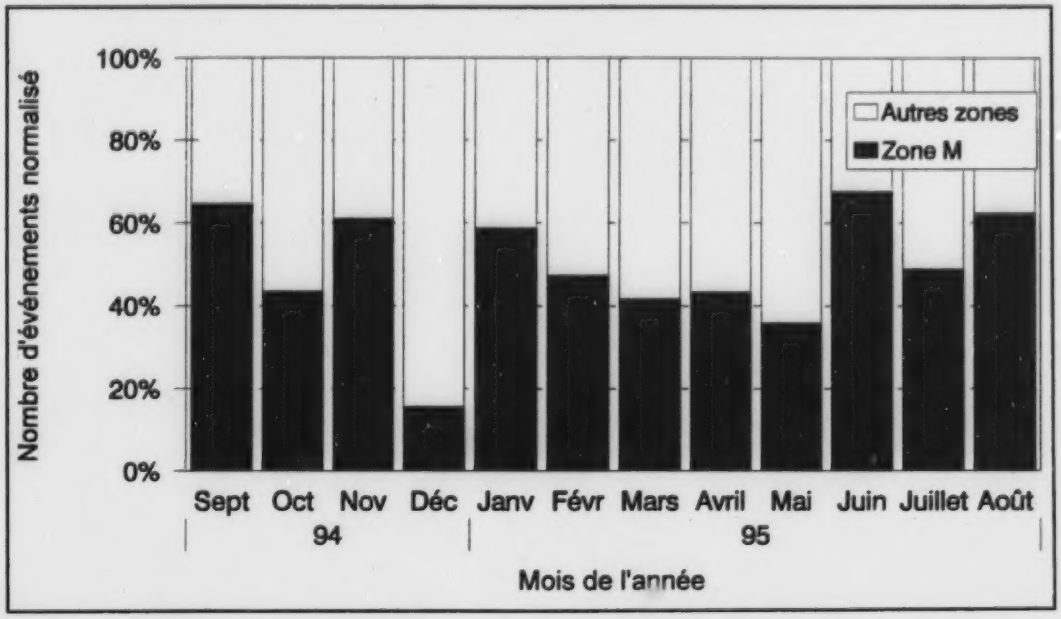


Figure 6 - Distribution mensuelle normalisée de l'activité séismique de la zone M

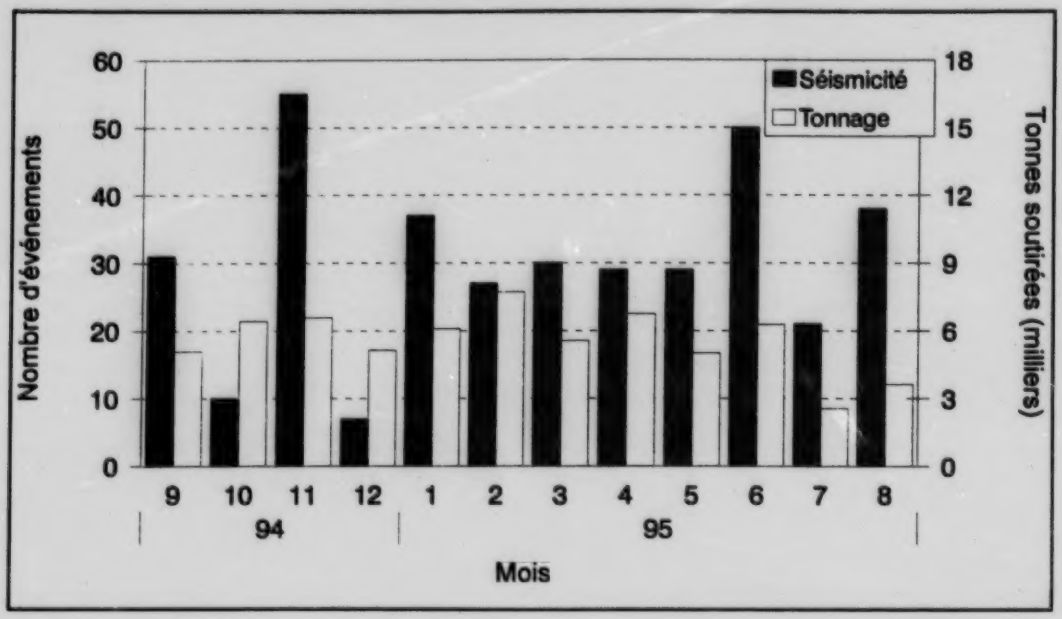


Figure 7 - Distributions mensuelles de l'activité séismique de la zone M et du taux de minage de ses chantiers exploités

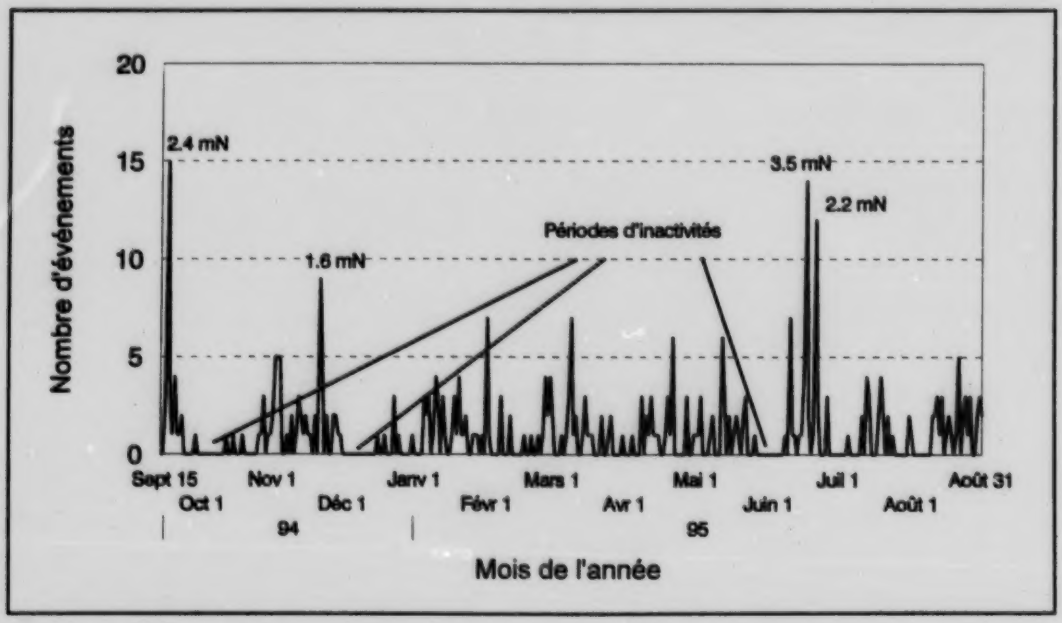


Figure 8 - Distribution quotidienne de l'activité séismique de la zone M

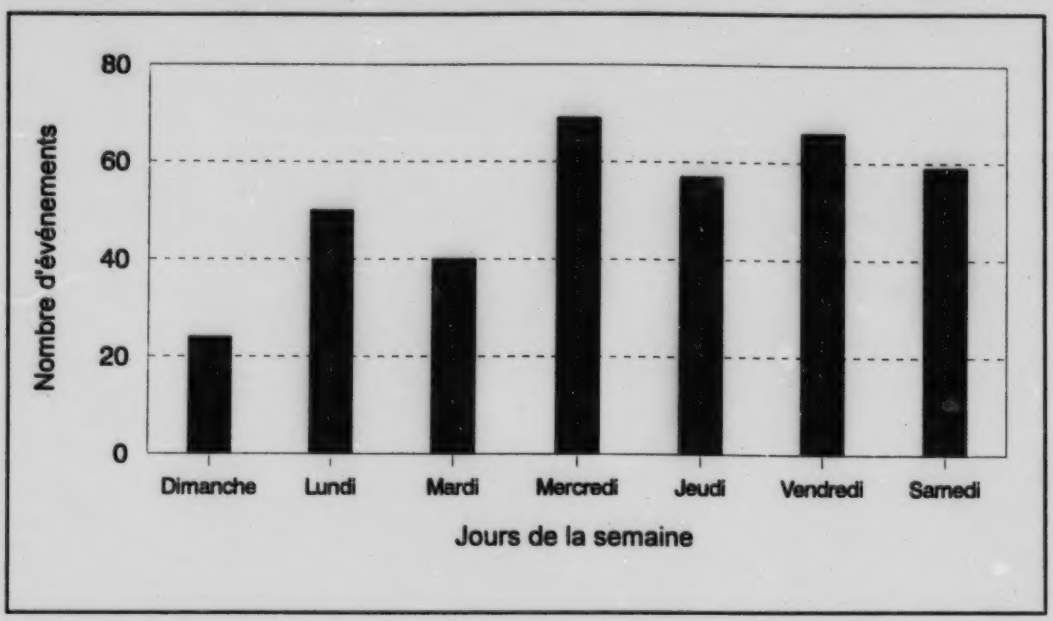


Figure 9 - Fréquence journalière de l'activité séismique de la zone M

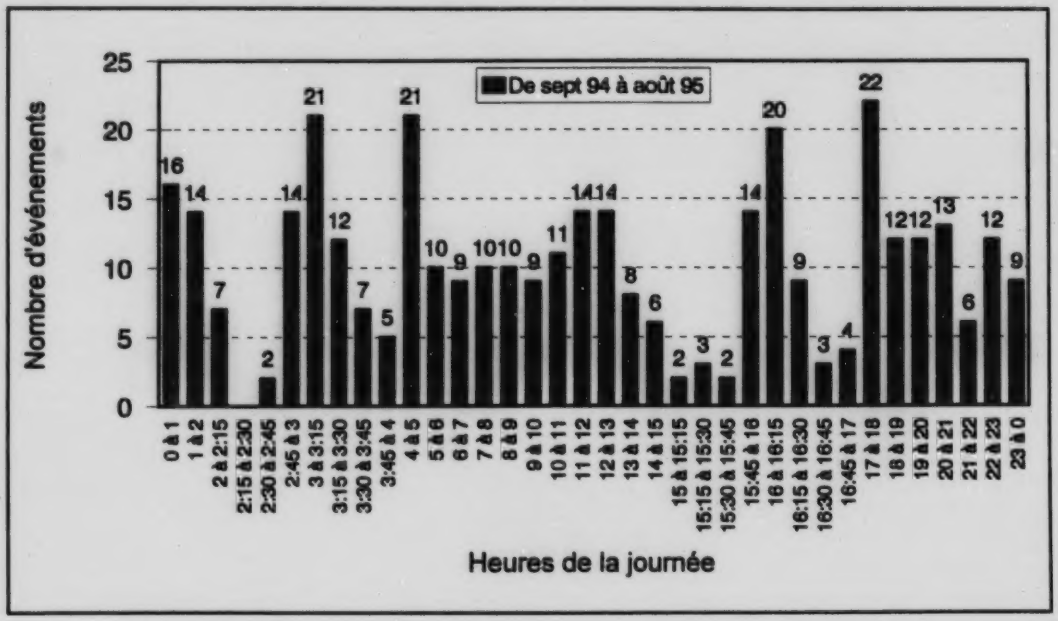


Figure 10 - Distribution horaire de la séismicité avec emphase sur les périodes de sautages

Quatre de ces périodes correspondent aux heures de sautages et aux heures les suivant. Il est possible que certains sautages secondaires, généralement effectués lors des heures de lunch, aient été interprétés comme des événements séismiques et soient inclus dans la distribution horaire pour la période entre 11:00 et 13:00. Aucune relation avec les sautages ne peut expliquer l'activité enregistrée entre 00:00 et 02:00.

Sur 364 événements localisés dans la zone M, 171 (47%) se sont produits entre les quarts de travail. Cela constitue près de la moitié des événements. Pour le quart de jour, 89 événements s'y sont produits (24%) alors que 104 événements (29%) sont survenus lors du quart de nuit. La distribution horaire de la zone M suit la même distribution que le reste de la mine (Côté et Plouffe, 1996).

7.2. Distribution de l'activité séismique par chantiers exploités

Cette section décrit brièvement les activités séismiques et minières des huit chantiers actifs au cours de la période étudiée. En Appendice C, on retrouve mensuellement, pour chacun de ces chantiers, le taux d'extraction ainsi que le nombre d'événements enregistrés. Suite aux événements des 16-21 juin 1995, l'extraction de la zone M a diminué en raison de la fermeture des chantiers des niveaux 25 à 30.

Chantier 2502 WB - Un seul événement, en mai 1995, a été localisé dans ce chantier. Le taux d'extraction est resté assez constant au cours des dix mois d'exploitation, avec une moyenne de 1080 tonnes.

Chantier 2502 EA - L'activité séismique ne reflète pas le taux de minage importants pour les mois de septembre 1994 à janvier 1995. À partir de février, l'activité séismique augmente significativement, peut-être en fonction de la hausse de l'extraction du chantier. De plus, en mars 1995, l'activité séismique a atteint son niveau le plus élevé avec 12 événements séismiques. Suite à cet accroissement de l'activité, le personnel de la mine a décidé de modifier la méthode de minage: de passer de la méthode coupe-et-remblai à celui de long-trou, dans la partie ouest du chantier.

Chantier 2602 E4 - En avril 1995, eut lieu la seule exploitation de ce chantier afin de le préparer pour modifier sa méthode de minage en long-trou. Aucun événement ne fut localisé dans le chantier ou dans ses alentours.

Chantier 2702 E2A - Il n'y a eu que très peu d'événements (12) dans ce chantier, considérant le fait que peu de tonnes ont été soutirées. Les événements du mois de juin sont probablement plus attribuables aux brusques changements de contraintes causés par les coups de toit au dessus du niveau 25 qu'aux résultats du minage.

Chantier 2802 E2A - Pour les douze mois, l'activité séismique du chantier est étroitement liée avec l'exploitation. Lorsque l'extraction augmente, l'activité séismique est en croissance. De même, lorsque le tonnage diminue pour un mois, l'activité séismique répond à la baisse. La forte hausse de l'activité séismique en novembre 1994 peut s'expliquer par sa réponse subite suite à l'élargissement anormal du chantier à 30 pieds. La hausse de janvier 1995 peut s'expliquer par l'accroissement du taux d'extraction mensuel par rapport à décembre 1994.

Chantier 3102 W2A - L'activité séismique de ce chantier semble, elle aussi, liée à l'exploitation, quoique de façon moins évidente que l'activité du chantier 2802 E2A.

Chantier 3102 EA - Tout comme le chantier 3102 W2A, l'activité séismique se corrèle bien avec le taux d'extraction du minerai. On remarque une augmentation de l'activité séismique pour les trois derniers mois de la période étudiée. Ceci peut être attribuable au fait que les chantiers 3102 W2A et 3102 EA sont, avec le chantier 3202 WA, les trois seuls chantiers encore en exploitation sur la zone M à ce moment.

Chantier 3202 WA - L'activité séismique de ce chantier est assez constante, avec une moyenne de trois événements pour les onze premiers mois, malgré les fluctuations du taux de minage. La seule exception est le mois d'août, avec 16 événements. Comme mentionné pour le chantier 3102 EA, cette hausse peut être causée par le fait que ce chantier est parmis les trois seuls qui demeurent exploités à ce moment sur la zone M. Les modifications potentielles des champs de contraintes ne se font que dans cette partie de la zone.

En égard des taux d'extraction et de l'activité séismique présente, on peut diviser les huit chantiers exploités de la zone M en quatre catégories:

A - Les chantiers dont l'activité séismique est liée à l'extraction minière, variant avec le taux d'extraction;

B - Les chantiers où il n'existe pas une activité séismique liée au taux d'extraction, c.-à-d. aucun événement séismique n'a été enregistré malgré une exploitation du chantier;

C - Les chantiers où une activité séismique a été enregistrée malgré l'absence d'extraction du chantier;

D - Les chantiers où l'activité séismique et l'extraction minière n'ont aucune relation entre elles.

Le Tableau 1 montre la distribution des chantiers par rapport à ces quatre catégories.

Tableau 1 - Distribution des chantiers selon leur séismicité

	Catégories			
	A	B	C	D
Chantiers	2502 EA 2802 E2A 3102 EA 3102 W2A 3202 WA	2602 E4 2702 E2A	2502 WC 2802 E3A 3002 E 3202 E	2502 WB

7.3. Description de la distribution de l'activité séismique

Entre les mois de septembre 1994 et août 1995, 364 événements séismiques ont été localisés dans la zone M ou ses environs. Chaque événement localisé fut placé sur la section longitudinale de la zone M, retrouvée en Appendice B. L'activité séismique est séparée par mois afin de mieux observer le comportement du massif et sa réponse aux variations de minage. Les sections de l'Appendice B couvrent les mois de septembre 1994 à août 1995. Pour le mois de novembre 1994, un agrandissement du chantier 2802 E2A a été fait afin de mieux voir l'activité séismique

s'y étant produite; le mois de novembre étant le plus actif pour ce chantier. Il devient alors évident que l'activité séismique se concentre près des chantiers exploités, sauf au mois de juin 1995, où les répliques à l'événement séismique de valeur de magnitude 3.5 m_N présentent des caractéristiques particulières, dont celles de se produire près de chantiers inexploités.

Les données relatives à l'exploitation des chantiers sont compilées, par le personnel de la mine, de façon mensuelle. Le lecteur peut consulter l'Appendice C pour connaître le nombre mensuel d'événements pour chacun des chantiers exploités sur la zone M, lors des 12 mois couverts par le présent rapport. Le tonnage mensuel extrait des chantiers est aussi indiqué sur les sections de l'Appendice B.

Le mois de septembre 1994 marque le début de la surveillance séismique à l'aide du système centralisé. Lors de ce mois, des ajustements fréquents des paramètres d'acquisition du système, ainsi que des problèmes de mise en marche, font que le nombre d'événements enregistrés en septembre 1994 est sûrement inférieur à la réalité. Toutefois, des tendances sont notables sur la section longitudinale de l'Appendice B. Le chantier 2802 E2A a été le plus actif. Les événements se sont produits tout au long du mois. Ces événements sont en majorité localisés dans l'éponte inférieure du chantier, sous le remblai. Deux événements importants ont eu lieu au cours du mois de septembre. Les 16 et 17 septembre 1994, une série de 20 événements s'est produite sur la zone M. Deux événements de magnitude 0.9 m_N, l'un à 03:01 sous le chantier 2502 EA, et l'autre à 06:44 sous le chantier inactif 2702 E, mais près du chantier 2502 EA, précèdent de 5 heures un événement plus important de magnitude 2.4 m_N survenu dans un pilier du chantier inactif 3002 E. La valeur de magnitude a été fournie par le Réseau séismographique canadien, les capteurs du système séismique ayant saturés en raison de l'importance de l'événement. Jusqu'à 14:36, les six événements qui suivent ont été localisés dans une sphère de 100 pieds de rayon de l'événement principal, dans l'ancien chantier 3002 E. À cette heure, un événement de 1.0 m_N s'est produit dans ce chantier. Après la séquence de sautage, qui a eu lieu vers 15:45, un autre événement de magnitude 0.8 m_N s'est produit au chantier 3002 E. Immédiatement après cet événement, l'activité séismique s'est déplacée au chantier 2802 E2A, où cinq événement se sont produits, avec des magnitudes respectives de -0.2, 0.0, 0.3, 1.2 et 2.0 m_N. Le lendemain, trois événements ont eu lieu sur la zone M, dont un important de magnitude 1.6 m_N au dessus du chantier 2502 EA, près de la monterie à l'ouest.

Le mois d'octobre ne révèle qu'une faible activité séismique. Dix événements ont été localisés sur la zone M. De ce nombre, la moitié se sont produits dans le chantier 2802 E2A. La magnitude la plus forte enregistrée pour ce mois était de 1.1 m_N, pour un événement localisé dans le chantier 2802 E2A.

Le mois de novembre marque, pour le chantier 2802 E2A, le mois le plus actif avec 42 événements. La distribution spatiale de l'activité séismique pour ce mois présente des concentrations particulières, principalement pour le chantier 2802 E2A. Une première concentration de 26 événements se situe au centre du chantier, dans l'éponte inférieure. Une seconde concentration de 14 événements est localisée à l'est du chantier, au pourtour de la monterie 2802 E2A. Il y a très peu d'événements pour le reste de la zone M, sauf une petite concentration de 5 événements qui se retrouve au-dessus du chantier 3102 W2A. On remarque, juste au dessus du niveau 24, deux événements qui semblent s'être produits dans les piliers des points de soutirage. La magnitude mensuelle maximale a été de 1.6 m_N pour un événement localisé près de la monterie 2802 E2A.

Il n'y a eu que 7 événements séismiques localisés sur la zone M en décembre 1994. Deux événements seulement pour les chantiers 2802 E2A, 3102 W2A et 3202 WA. Notons que le plus important événement avait une magnitude de 1.0 m_N et était localisé dans le chantier 2802 E2A.

En janvier 1995, l'activité séismique a repris dans le chantier 2802 E2A. Vingt-sept événements sur un total de 33 s'y retrouvent. L'événement le plus important pour ce mois avait une magnitude de 1.2 m_N et il s'est produit au dessus du chantier 2502 EA. On peut noter que très peu d'événements se sont produits près du chantier 2502 EA, toutefois ces événements s'y produisant sont d'importance, avec des valeurs de magnitude supérieures à 1.0 m_N. Ceci est peut-être une indication que les contraintes qui se retrouvent près de ce chantier sont relâchées plus violemment que dans le cas du chantier 2802 E2A.

Durant le mois de février 1995, des événements commencent à se produire sous le chantier 3102 EA. Ces événements se localisent en majorité près de l'ancien chantier 3202 E où un pilier de quartz y avait été laissé. L'événement le plus important est encore dans le chantier 2802 E2A, où une baisse de l'activité séismique peut se corréler avec une baisse du tonnage soutiré,

comparativement à janvier. Notons qu'un petit événement s'est produit dans un pilier des points de soutirage au dessus du niveau 24.

L'activité séismique du mois de mars se compare à celle du mois de février, avec la différence qu'un peu plus d'événements se sont produits au dessus du chantier 2502 E2A. L'événement le plus important avait une valeur de magnitude de 1.4 m_N et est survenu dans le chantier 2802 E2A.

Comme peu de minerai a été extrait du chantier 2802 E2A en avril 1995, l'activité séismique de ce chantier a diminué considérablement. Le chantier le plus actif pour ce mois d'avril est le 3102 W2A. Ce qui est remarquable pour ce mois, ce sont les quatres événements qui se sont produits dans les piliers des points de soutirage au dessus du niveau 24. Le plus important événement de ce mois avait une magnitude de 1.5 m_N et s'est produit au dessus du chantier 2502 E2A.

Pour le mois de mai, les événements du chantier 2802 E2A semblent avoir migrés sous le chantier, dans les limites de l'ancien chantier 2902 EB. Cette migration n'est pas présente au cours des mois subséquents. De plus, d'autres événements se sont produits dans les piliers des points de soutirage près du niveau 24. Aussi, deux événements de magnitude 1.1 m_N et 0.6 m_N sont survenus en dehors des limites des chantiers. Aucune explication à ce jour ne permet de connaître la cause de la génération d'événements séismiques à ces endroits.

L'activité séismique du mois de juin 1995 comprenant l'événement du 16 juin 1995 de valeur de magnitude 3.5 m_N sera traitée à la Section 9.

L'activité séismique des mois de juillet et août 1995 est concentrée aux trois chantiers suivants: le chantier 3102 W2A avec cinq événements, le chantier 3102 EA avec trois événements localisés probablement dans le pilier de quartz du chantier sous-jacents 3202 E, et finalement le chantier 3202 WA avec quatre événements. Ces trois chantiers sont les seuls desquels du minerai a été extrait pour ces deux derniers mois.

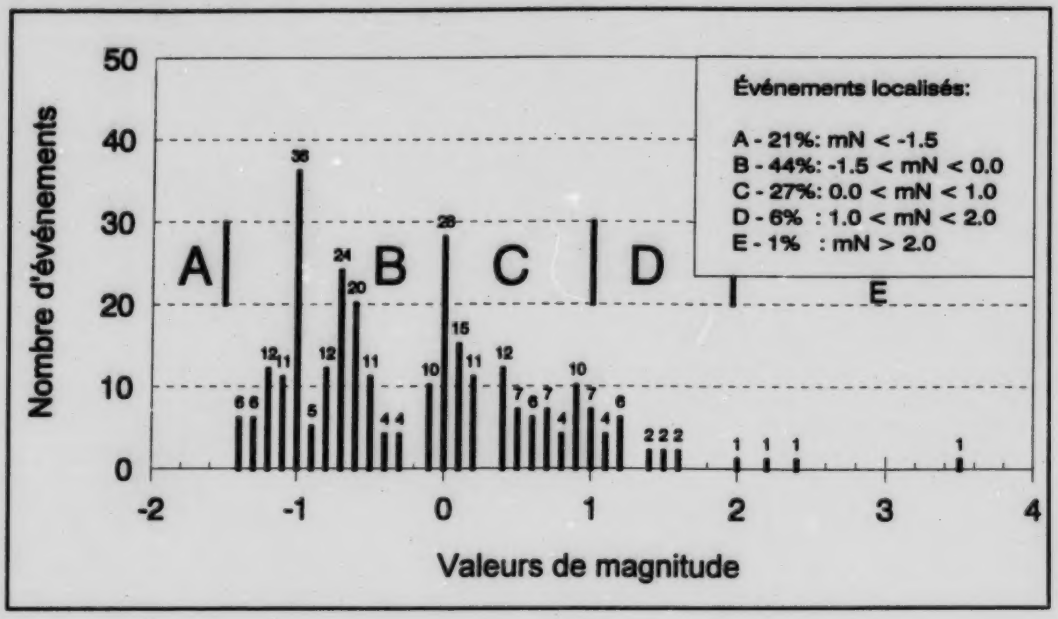


Figure 11 - Distribution des valeurs de magnitude

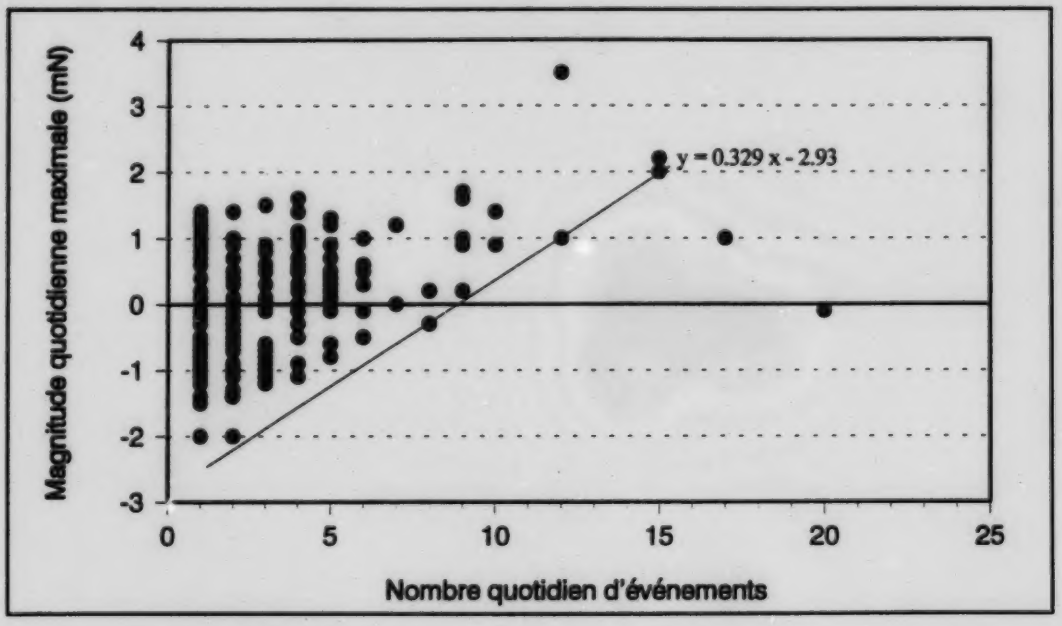


Figure 12 - Corrélation entre le nombre quotidien d'événements et la valeur de magnitude quotidienne maximale

8. Magnitude, énergie et VMP

8.1. Distribution de la magnitude

Sur les 364 événements localisés sur la zone M entre les mois de septembre 1994 et août 1995, 76 avaient une magnitude inférieure à -1.5 m_N, seuil inférieur limite que le système peut enregistrer. Leurs énergies étaient beaucoup trop faible afin de calculer leur magnitude. Cette proportion représente 21% des événements localisés dans la zone M.

Tel que le mentionne Hedley (1992), les événements de faible magnitude sont beaucoup plus nombreux que les événements de forte magnitude. Il y a eu 161 événements avec des magnitudes inférieures à 0 m_N (44%) (Figure 11), 100 événements avec des magnitudes comprises entre 0 et 1 m_N (27%), 23 événements entre 1 et 2 m_N (6%), et finalement, seulement 4 événements (1%) avaient des magnitudes supérieures à 2 m_N. Hedley (1992) a aussi établi trois catégories associées aux dommages observés à la suite d'événements séismiques. Cette division des valeurs de magnitude selon les dommages n'a pas encore été faite pour la mine Sigma. Une étude permettant d'établir une telle charte pourrait se faire dans un futur rapproché, à la suite d'une entente particulière avec le personnel de la mine Sigma.

Pour la mine Sigma, plus il y a d'événement enregistré pour une seule journée, plus la magnitude maximale enregistrée est élevée. La Figure 12 montre, pour l'ensemble de la mine, une compilation du nombre quotidien d'événements et la magnitude maximale enregistrée pour chaque jour. Généralement, plus il y a d'événement au cours d'une seule journée, plus forte est la magnitude maximale au cours de cette même journée. Toutefois, le contraire n'est pas vrai. Comme le montre la Figure 12, il y a eu des jours au cours desquels un seul événement était enregistré, mais cet événement avait une valeur de magnitude supérieure à 1.0 m_N. Toutefois, cette hypothèse de travail ne tient pas compte de l'heure d'arrivée des événements, au début ou à la fin de la journée. Sur la Figure 12, une courbe limite minimale est tracée. Cette courbe représente la valeur inférieure que la magnitude maximale, y, devrait atteindre pour un nombre d'événements quotidiens:

$$y = 0.329x - 2.93 \quad (3)$$

où x est le nombre d'événements enregistrés au cours d'une seule journée. Par exemple, si au cours d'une journée, douze événements séismiques se sont déjà produits, on peut supposer statistiquement que la valeur de magnitude maximale que l'on peut s'attendre pour les événements de cette série ou des événements subséquents serait supérieure à 1 m_N. Cette valeur est basée sur l'activité séismique passée de la mine Sigma et ne représente qu'une équation empirique qui pourrait servir à définir une activité future de cette mine.

8.2. Distribution de l'énergie séismique

La dissipation de l'énergie, au fur et à mesure que se produisent les événements séismiques, a été calculée et corrélée avec le taux cumulatif d'extraction des chantiers de la zone M. La Figure 13 montre les deux courbes de l'énergie cumulative et du tonnage cumulatif pour la zone M. L'événement du 16 juin 1995, de par l'importance de son énergie (631 MJoules), éclipserait la valeur cumulative de tous les autres événements (61 MJoules) et ne permettrait pas de voir la variation cumulative. C'est pourquoi l'énergie de cet événement n'a pas été incluse dans la courbe de l'énergie cumulative.

Il n'est pas surprenant de constater que le tonnage cumulatif suit une droite, sachant que la production mensuelle de la mine doit être constante, selon les budgets établis. Quant à l'énergie cumulative, sa croissance est constante pour l'ensemble du puits #3 (Côté et Plouffe, 1996), si on fait abstraction des deux événements de magnitude 2.4 et 2.2 m_N survenus les 16 septembre 1994 et 21 juin 1995. Dans le cas des énergie enregistrée sur la zone M, nous remarquons une partie rectiligne entre décembre 1994 et avril 1995 (Figure 13). Cette courbe présente une inflexion pour mai et juin 1995. En retournant en arrière, il serait facile d'interpréter cette inflexion à l'événement de 3.5 m_N qui a eu lieu le 16 juin. De plus, la période d'inactivité précédant cet événement important se réflète aussi dans la courbe de l'énergie cumulative de la zone M. Avant de sauter trop rapidement à une telle conclusion, une étude sur une plus grande période de temps et avec d'autres événements importants devrait être faite.

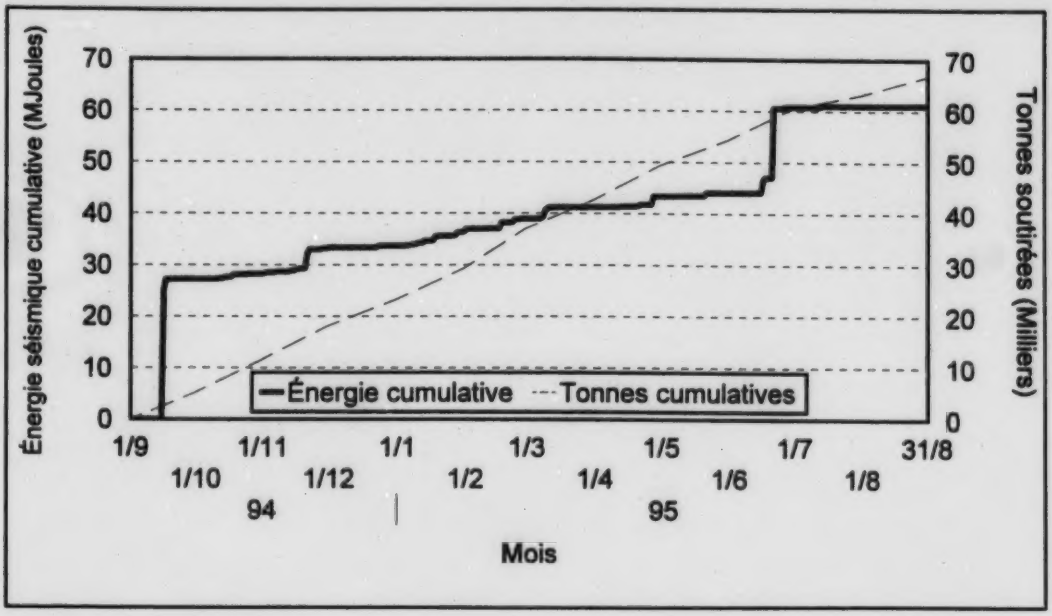


Figure 13 - Corrélation entre le taux quotidien cumulatif de libération d'énergie séismique et le taux mensuel cumulatif d'extraction minière pour la zone M

8.3. Distribution des vitesses maximales des particules

Même si, pour l'instant, aucun rapport de dommages n'est disponible pour inclure dans ce rapport, il serait intéressant, en utilisant un paramètre connu des membres du domaine minier (soit la VMP ou *PPV*), de voir l'ordre de grandeur des dommages potentiels. Dans les études de sautages et de coups de toit, la vitesse maximale des particules et, dans une moindre mesure, leur accélération et leur déplacement maximaux, sont les principaux critères d'évaluation des dégats causés aux systèmes de soutènement et aux structures souterraines.

Pour se faire, tous les événements localisés dans la zone M et ayant une valeur de magnitude supérieure à 0.5 m_N furent choisis. Afin d'établir les valeurs des VMP aux lieux où se sont produits les événements séismiques, les valeurs des VMP aux cinq capteurs triaxiaux furent calculées. Le Tableau 2 montre les valeurs minimales et maximales de ces VMP ainsi que l'écart des distances des différents événements séismiques à ces capteurs.

Tableau 2 - Vitesses maximales des particules

Capteur	Niveau	VMP (mm/s)			Écart des distances (m)
		Maximale	Minimale	Moyenne	
T1	24	3.806	0.301	2.400	236 - 531
T2	29	4.408	0.250	1.685	295 - 499
T3	30	4.207	0.059	0.668	455 - 861
T4	30	3.662	0.035	0.638	393 - 792
T5	38	5.479	0.066	0.816	351 - 707

Ne connaissant par l'équation d'atténuation propre aux conditions de la mine Sigma, deux équations furent utilisées pour empiriquement déterminer les valeurs de VMP aux localisations de ces événements séismiques. La première de Holmberg et Persson (1980) est employée pour les roches compétentes des massifs suédois:

$$PPV = \frac{700 W^{0.7}}{R^{1.5}} \qquad (4)$$

où PPV est la vitesse maximale des particules, en mm/s, W, le poids de la charge explosive, en kg, et R, la distance, en mètres. Même si les constantes sont spécifiques pour chaque site, les roches retrouvées en Suède font partie d'un bouclier précambrien similaire à celui où se trouve la mine Sigma. Une seconde équation, développée par le U.S. Bureau of Mines, suit la forme:

$$PPV = 1143 \, (R/\sqrt{W})^{-1.6} \qquad (5)$$

où W est le poids total de l'explosif par délai de 8 ms et exprimé en kg. À partir des données de chaque capteur, dont le Tableau 2 donne le résumé, une charge explosive équivalente moyenne, $W_{moyenne}$, fut déterminée pour chacun des événements séismiques. Puis utilisant cette charge équivalente, des VMP (ou *PPV*) empiriques, basées sur les équations, furent calculées pour les distances de 5 et 20 mètres (Tableau 3).

Tableau 3 - Vitesses empiriques maximales des particules

VMP (mm/s)		Équations	
		Holmberg et Persson (1980)	USBM
Distance à 5 mètres	Maximale	5234.608	8282.189
	Minimale	173.922	271.786
	Moyenne	889.860	1702.365
Distance à 20 mètres	Maximale	654.326	901.258
	Minimale	21.740	29.575
	Moyenne	111.234	185.294

Hedley (1992) décrit certains critères de dommages, sur des études basées sur Lenhardt (1988) et Blake et Cuvelier (1988). Les chûtes de roches instables se produisent à des vitesses aussi basses que 50 mm/s. La fracturation du massif rocheux intact commencent vers 300 mm/s et des dommages sérieux vers 600 mm/s. Il s'en suit qu'empiriquement les événements les plus importants générés à la mine Sigma (magnitude $> 0.5\ m_N$) n'ont pas tous produit des dommages et que ceux-ci, s'ils ont eu lieu, ont sans doute varié entre la chûte de roches instables jusqu'à des dommages sérieux.

9. Analyse de la séquence du 16 au 21 juin 1995

C'est au cours du mois de juin 1995 que s'est produit le plus important événement séismique jamais enregistré à la mine Sigma. Avec une magnitude calculée de 3.5 m_N par le Réseau séismographique de l'Est du Canada, cet événement est considéré comme l'un des plus importants à survenir dans une mine canadienne.

A posteriori, certains signes potentiellement précurseurs semblent avoir eu lieu mais leurs significations, à l'époque, n'étaient pas claires:

- Une série de piliers des points de soutirage, au niveau 24, ont subi des

événements séismiques au cours des mois de novembre 1994, février, avril et mai 1995, avec 2, 1, 4 et 2 événements au cours de ces mois. Les valeurs de magnitude de ces événements ont varié entre -1.3 et 0.3 m_N, ce dernier s'étant produit le 19 novembre 1994;

- Une certaine activité séismique a pu être localisée au-dessus du chantier 2502 EA. En septembre 1994, un événement de magnitude 2.4 m_N a eu lieu. L'activité séismique s'est poursuivi dans la même région en octobre 1994, janvier et février 1995 avec 2, 1 et 2 événements, respectivement. En mars, cinq événements, dont 4 dans un intervalle de 3 jours, ont fait que le personnel technique de la mine Sigma a procédé à la modification de la méthode de minage, passant de coupe-et-remblai à long-trou. En avril et mai 1995, 3 (un de magnitude 1.5 m_N et 1 événements se sont produits respectivement;
- Un autre précurseur potentiel serait la période d'absence d'activité séismique qui s'est étalée entre le 26 mai au 8 juin 1995, pour une durée de 13 jours, au cours de laquelle aucun événement n'a été localisé dans la zone M. Bien plus, aucun événement n'a été enregistré entre le 29 mai au 8 juin 1995 pour l'ensemble de la mine Sigma. C'est lors de cette période d'accalmie que l'énergie de déformation, dans le système des contraintes, se serait accumulée pour atteindre un seuil suffisant pour générer l'événement du 16 juin 1995.

Après un événement de magnitude -0.5 m_N le 8 juin, au dessus du chantier 2502 EA, sept événements se sont produits lors de la seule journée du 10 juin, dont 6 dans la partie ouest du chantier 3102 W2A. La magnitude maximale pour cette journée était de -0.1 m_N. La séquence se poursuivit avec un événement de 0.2 m_N au dessus du chantier 2502 EA le 11 juin, un autre le jour suivant au chantier 3102 W2A de magnitude inférieure à -1.5 m_N, puis un autre événement le 14 juin de magnitude -0.7 m_N près de la monterie 2802 E2A et finalement, un dernier dans le pilier de quartz du chantier 3202 E de magnitude -0.1 m_N, le 15 juin.

L'événement du 16 juin de valeur de magnitude 3.5 m_N est survenu immédiatement après un premier sautage long-trou dans une monterie du chantier 2502 E2A. Ce chantier était exploité auparavant par la méthode coupe-et-remblai. En mars 1995, suite à une augmentation de l'activité séismique dans ce chantier, la décision d'exploiter par la méthode long-trou fut prise. Les changements subits de contraintes causés par le sautage des premières rangées long-trou auraient-ils été suffisants pour déclencher à eux seuls un tel événement ? Il est aussi possible que d'autres circonstances aient pu intervenir dans la modification du régime de contraintes, qui aurait déclenché cet événement. Des dommages ont été observés à la suite de cet événement.

Cet événement a été le premier de plusieurs séquences d'événements séismiques qui se sont produites au cours des 42 heures suivantes. Une première séquence d'une durée de 35 secondes

inclut 2 événements qui ont suivi immédiatement l'événement de magnitude 3.5 m_N. Ces 2 événements ont eu une valeur de magnitude de 0.9 et de -0.7 m_N, et ils se sont produits aux niveaux 22 et 25, respectivement; et cela dans la zone M-Branche.

Suivant une accalmie d'une heure, une seconde séquence d'une durée de 80 minutes, incluant 9 événements séismiques, s'est produite. Leurs valeurs de magnitude ont toutes été plus petites que 1.5 m_N. La séquence a débuté par un événement de magnitude 0.5 m_N, provenant de la mine Lamaque. Ont suivi 6 événements dont les valeurs de magnitude ont varié entre -0.7 et 1.5 m_N. Ces événements ont tous été localisés dans un rayon de 120 m de la localisation de l'événement de 3.5 m_N. Pour conclure cette séquence, 2 événements de magnitude inférieure à -1.0 m_N se sont produits près du chantier 3716 WC. Trois événements de cette deuxième séquence ont été localisés sur la zone M.

Une seconde accalmie semble s'être produite entre 18:30, le 16 juin, et 00:00, le 17 juin. Vers 00:20, une troisième séquence d'une durée approximative de 5 heures a inclus 7 événements. Leurs valeurs de magnitude sont majoritairement inférieures à 0.0 m_N, sauf pour un événement. Six de ces événements se sont produits dans la zone M entre les niveaux 24 et 26.

Environ 7.5 heures après le dernier événement de la troisième séquence, une série de 6 événements dont 4 sur la zone M s'est étalée entre 12:00 et 22:33, le 17 juin 1995. Ces événements de magnitude variant entre -1.0 et 0.4 m_N ont été localisés entre les niveaux 21 et 32.

A suivi une quatrième séquence de 4 événements (un événement de magnitude 1.0 m_N suivi de 3 répliques), d'une durée de 30 minutes, près du chantier 2702 E2. Trois événements localisés près de ce dernier chantier ont eu lieu au cours des 12 heures suivant cette dernière séquence, puis l'activité séismique a décrue pour reprendre le 21 juin.

Le 21 juin, suivant 3 événements localisés sur la zone O-16, une série de 12 événements s'est produite entre les niveaux 24 et 25, sur la zone M, mais de l'autre côté du travers-banc par rapport aux événements des 16-17 juin. Cette série a débuté par un événement de magnitude 2.4 m_N, puis l'importance des événements a varié entre -1.1 et 0.9 m_N. Ces événements se sont

produits près du chantier 2502 WC.

En plus de la région au-dessus des chantier 2502 WC et 2502 E2A, deux autres nouveaux foyers d'activité séismique sont apparus dans les jours suivant les événements de 3.5 et 2.4 m_N. Les événements du 17 juin sont majoritairement localisés à l'ouest de l'ancien chantier 2702 E; l'événement le plus important de cette région avait une magnitude de 1.0 m_N. Et après l'événement de 2.4 m_N, du 21 juin, quatre événements ont été localisés dans le pilier au dessus de l'ancien chantier 2802 E3, près de la monterie 2802 E3A. Pour cette autre région, l'événement le plus important avait une magnitude de 0.9 m_N.

10. Analyse des mécanismes au foyer

10.1. Théorie

Horner et Hasegawa (1978) ont identifié six mécanismes d'événements séismiques causés par l'exploitation minière:

a) chutes de roche (*rockfalls*);
b) coups de pilier ou implosions de pilier (*pillar bursts*);
c) failles de tension (*tensional faults*);
d) failles normales (*normal faults*);
e) failles renversées (*thrust faults*);
f) failles renversées horizontales (*shallow - near horizontal - thrust faults*).

Ils produisent des répartitions différentes des mouvements du roc (Figure 14). La plupart de ces types peut être regroupée en un modèle double-couple de faille et un modèle d'implosion de pilier.

La Figure 15A illustre la configuration des mouvements du roc que produirait un glissement le long d'une faille verticale. Des séismographes distribués en périphérie d'un événement séismique enregistrent des ondes de compression ou de dilatation, caractérisées par leur polarité. La polarité est obtenue en analysant le premier mouvement des particules enregistré à un séismographe donné. Le premier mouvement se définit arbitrairement et représente la direction du premier cycle de l'onde. Il est assumé que les premiers mouvements représentent le modèle de double-couple de faille.

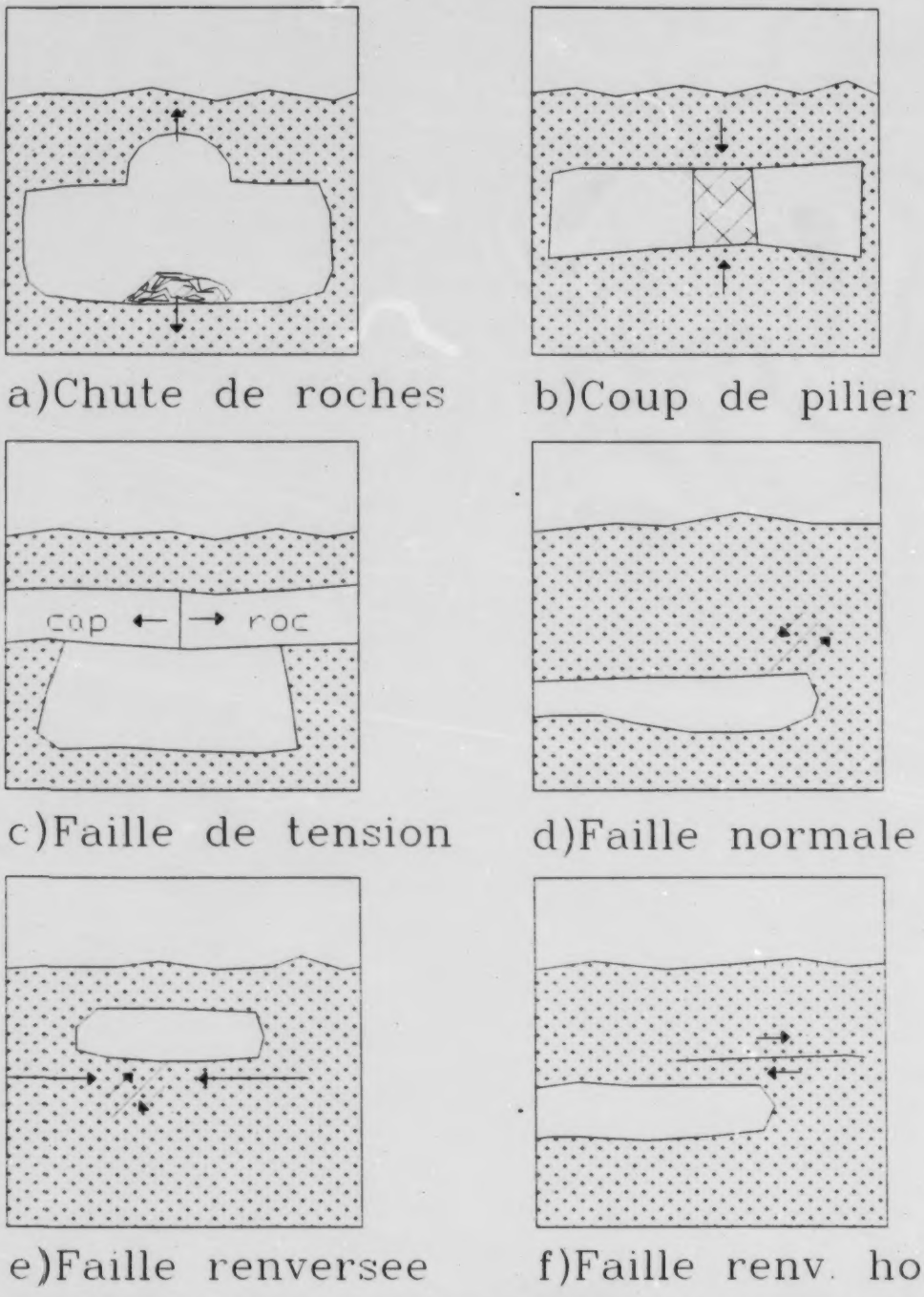


Figure 14 - Représentation des six mécanismes possibles générant des événements séismiques dans un environnement minier

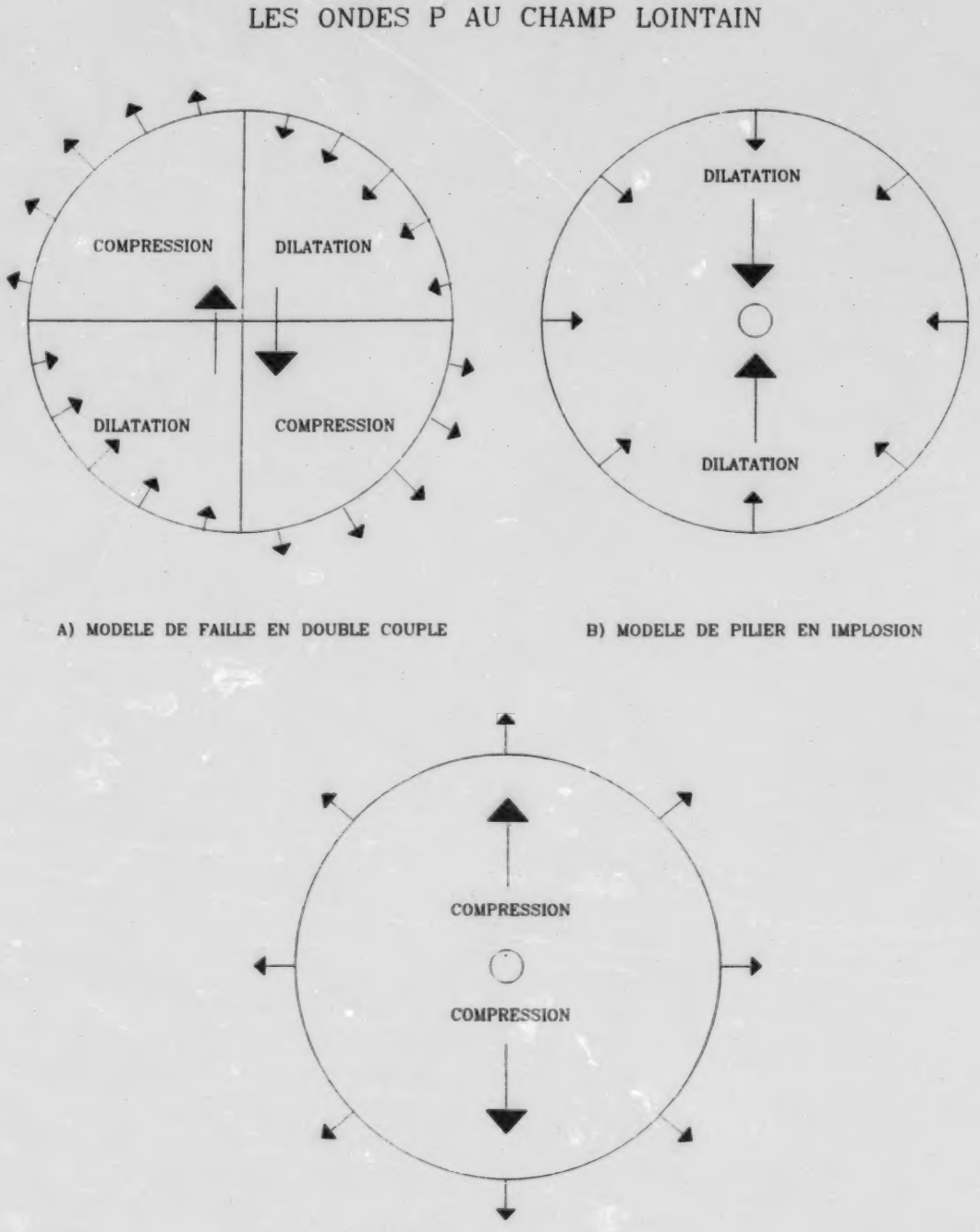


Figure 15 - Représentation de différents types de mécanismes au foyer

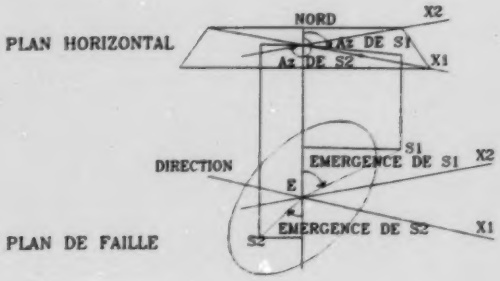
La Figure 15B illustre un coup de pilier. Un tel mécanisme est une implosion dont les premiers mouvements des particules se dirigent vers le pilier. Par conséquent, les polarités enregistrées aux séismographes en périphérie d'un événement traduisent un mouvement des particules qui s'éloignent des capteurs, et sont donc considérées comme des dilatations.

Il est bon de noter qu'à l'opposé un sautage est considéré comme une explosion dont tous les premiers mouvements se dirigent en périphérie du sautage (en s'éloignant de la source). Ainsi, les polarités enregistré aux séismographes sont considérées comme des compressions (Figure 15C). En conséquence, un sautage, dont les coordonnées sont connues, peut être utilisé pour définir les conventions à adopter lors de la détermination de la polarité des séismographes.

En positionnant les polarités (compression ou dilatation) sur une projection stéréographique iso-aire, hémisphère inférieur, des zones adjacentes de compression (ombrées) et de dilatation sont obtenues. Ces zones sont divisées à l'aide de deux plans (courbe sur une projection stéréographique) orthogonaux, appelés plans focaux. Un de ces plans représente le plan de faille (plan principal), et l'autre le plan orthogonal au plan de faille (plan auxiliaire ou conjugué) (Figure 16). Malheureusement, la projection stéréographique ne permet pas de différencier les deux plans: les directions et pendages obtenus doivent être comparés à une autre source d'information, la géologie exposée par exemple, pour déterminer lequel des deux plans représente le plan de faiblesse.

Les projections stéréographiques des mécanismes au foyer, qui se retrouvent en Appendice D, présentent, pour chaque événement, la localisation des capteurs par rapport à l'événement ainsi que la polarité des ondes enregistrées aux capteurs. Dans le cas d'un mécanisme de mouvement le long d'une discontinuité, les deux plans conjugués ainsi que trois axes sont aussi représentés. Ces trois axes sont l'axe P de compression maximale, l'axe T de compression minimale et l'axe B de mouvement nul ou d'intersection des deux plans (Figure 16). Ces axes correspondent respectivement à la direction des contraintes principales maximales, minimales et intermédiaires qui ont produit la rupture violente.

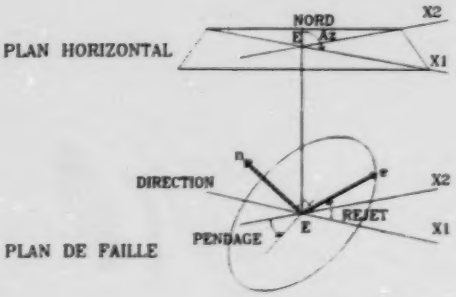
A) AZIMUT ET EMERGENCE POUR DEUX SEISMOGRAPHES (S1 ET S2):



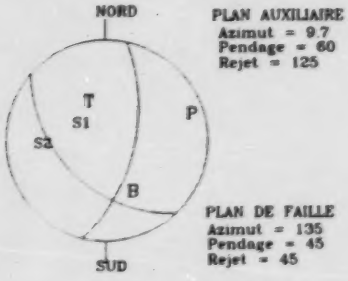
S1: AZIMUT = 130
EMERGENCE = -60

S2: AZIMUT = 270
EMERGENCE = 45

B) AZIMUT, PENDAGE ET REJET D'UN PLAN DE FAILLE:



C) PROJECTION STEREOGRAPHIQUE (ISO-AIRE, HEMISPHERE INFERIEUR) DU PLAN DE FAILLE EN B) ET LOCALISATION DES SEISMOGRAPHES EN A):



PLAN AUXILIAIRE
Azimut = 9.7
Pendage = 60
Rejet = 125

PLAN DE FAILLE
Azimut = 135
Pendage = 45
Rejet = 45

S1: AZIMUT = 310 (+ 180 POUR CORRESPONDRE AU MEME PLAN)
EMERGENCE = 60 (VERS L'OUEST)

S2: AZIMUT = 270
EMERGENCE = 45 (VERS LE SUD-OUEST)

Figure 16 - Explications au sujet de la création d'une projection stéréographique

L'orientation des plans conjugués se définie avec les paramètres suivant (Figure 16):

- azimut (*azimuth*): angle entre le Nord et l'axe de direction du plan focal (0 à 360°). La convention du pendage à droite est utilisé.
- pendage (*dip*): angle formé par le plan horizontal et le plan de faille (0 à 90°);
- rejet (*rake*): angle entre l'axe de direction et le vecteur-mouvement (e) (0 à 180°).

10.2. Résultats

De tous les événements enregistrés entre décembre 1994 et août 1995, sur la zone M, seuls les événements de magnitude supérieure à 0.8 m_N, c'est-à-dire 22 événements, ont été étudiés afin de déterminer leur mécanisme au foyer. La localisation des événements retenus sont présentés au Tableau 4 de même que sur les sections de l'Appendice D. De plus, le Tableau 4 résume les résultats de l'analyse des mécanismes au foyer. Les stéréonets de ces 22 événements sont en Appendice D.

Sur ces 22 événements retenus, la moitié présente des mécanismes de rupture selon le modèle du coup de pilier. Parmi ceux-ci, dix événements ont eu lieu dans les épontes inférieures de chantiers, dont six proviennent du chantier 2802 E2A. L'événement du 16 juin, de magnitude 3.5 m_N, s'est probalement produit, lui aussi, dans l'éponte inférieure du chantier 2502 EA. Dans le cas de l'événement du 16 juin à 17:30, de magnitude 1.2 m_N, il se pourrait, étant donné une erreur de localisation de l'ordre de 20 pieds, qu'il se soit produit dans un des piliers des points de soutirage au-dessus du niveau 24. Il est aussi possible que cet événement se situe juste sous le chantier du 24, dans l'éponte inférieure. La localisation de ces événements dans les épontes inférieures confirme le fait que selon des études géomécaniques (Labrie, 1994), ces épontes sont constituées de matériaux compétents, donc propice à la génération d'événements séismiques.

Les onzes autres événements étudiés dans cette section présentent des mécanismes de rupture selon un mouvement le long d'une discontinuité. De façon générale, tel que résumé au Tableau 4, la majorité de ces mouvements se sont produit selon une orientation préférentielle Est-Ouest, en conformité avec l'orientation des structures géologiques de la zone M (zones de cisaillement, veines minéralisées), et perpendiculaire à la contrainte principale maximale. Il y a aussi des plans qui présentent une orientation plus ou moins Nord-Sud (Figure 17). Ces orientations sont consistantes avec l'orientation des dykes de diabase qui recoupent les zones de cisallement.

Vu le faible nombre d'événements étudiés, il est impossible de déterminer si les proportions ci-haut mentionnées sont représentatives des mécanismes des événements séismiques pour la zone M, ou pour l'ensemble de la mine. Par contre, on peut avancer que plus d'un type de mécanismes se manifestent à la mine Sigma, contrairement aux mines d'Elliot Lake (Hedley, 1990) où seulement des coups de pilier ont été enregistrés. De plus, il semblerait que plus un événement séismique est près d'une cavité minière, plus le mécanisme au foyer différerait d'un mécanisme double-couple.

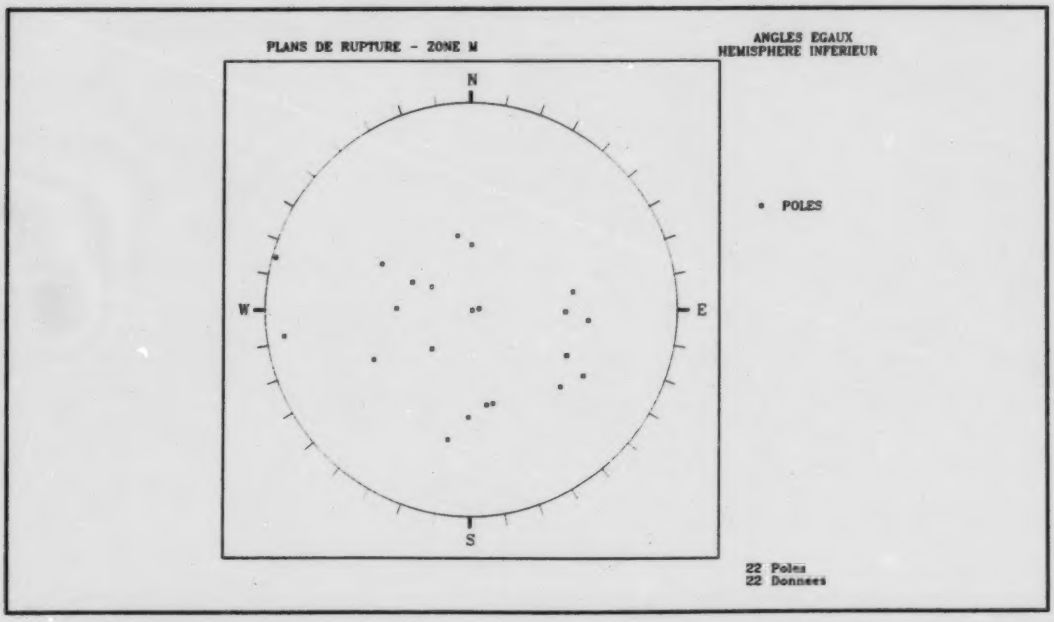


Figure 17 - Polarités des plans de faille des mécanismes au foyer étudiés

Tableau 4: Résumé de l'analyse des mécanismes au foyer

Date	Heure	Magnitude	Chantier	Mécanisme	Orientation
23 décembre 94	15:26:32	1.0	2802 E2A	Coup de pilier	
10 janvier 95	09:05:20	0.9	2802 E2A	Coup de pilier	
13 janvier 95	01:04:58	0.9	2802 E2A, monterie	Mouvement le long d'une discontinuité	N346, 50[4] (N117, 52) R = -54 (-125)
18 janvier 95	03:19:36	1.2	2802 E2A	Coup de pilier	
28 janvier 95	02:58:27	1.2	2502 EA	Coup de pilier	
1 février 95	03:08:14	0.9	2802 E2A	Coup de pilier	
1 février 95	11:08:29	0.9	2802 E2A, à l'ouest du chantier	Mouvement le long d'une discontinuité	N10, 65 (N260, 54) R = 40 (149)
17 février 95	16:02:09	1.4	2802 E2A	Coup de pilier	
23 février 95	17:24:29	1.2	2802 E2A, monterie	Mouvement le long d'une discontinuité	N350, 50 (N170, 40) R = 90 (90)
8 mars 95	18:08:22	1.0	2502 EA	Mouvement le long d'une discontinuité	N310, 60 (N63, 56) R = 140 (37)
9 mars 95	07:15:37	1.4	2802 E2A	Coup de pilier	
10 mars 95	16:08:20	1.1	3102 EA, pilier de quartz	Coup de pilier	
21 avril 95	15:52:25	1.0	3102 W2A	Coup de pilier	
27 avril 95	03:38:21	1.5	2502 EA	Mouvement le long d'une discontinuité	N115, 35 (N295, 55) R = 90 (90)
21 mai 95	03:46:34	1.1	Dyke	Mouvement le long d'une discontinuité	N105, 89 (N285, 1) R = 90 (90)
16 juin 95	15:59:32	3.5	2502 EA	Coup de pilier	
16 juin 95	17:22:19	1.5	Dyke	Mouvement le long d'une discontinuité	N0, 55 (N180, 35) R = 90 (90)

[4] Les orientations se présentent comme suit: NXX, YY représentent l'azimut, par rapport au Nord, et le pendage du plan de faille principal. Le paramètre R exprime le rejet, c.-à-d. la direction du mouvement dans le plan de faille. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs du plan conjugué.

Date	Heure	Magnitude	Chantier	Mécanisme	Orientation
16 juin 95	17:30:41	1.2	Dyke ou pilier du point de soutirage	Coup de pilier	
17 juin 95	22:33:21	1.0	2702 E, monterie	Mouvement le long d'une discontinuité	N82, 85 (N262, 5) R = 90 (90)
21 juin 95	08:59:27	2.2	2502 WC	Mouvement le long d'une discontinuité	N91, 40 (N271, 50) R = 90 (90)
21 juin 95	11:35:17	0.9	2502 WC	Mouvement le long d'une discontinuité	N45, 30 (N225, 60) R = 90 (90)
26 juin 95	01:42:06	0.9	2802 E2A, monterie	Mouvement le long d'une discontinuité	N300, 65 (N120, 25) R = 90 (90)

11. Conclusions

En 1994 commença l'enregistrement de l'activité séismique de la mine Sigma au moyen d'un système séismique centralisé. Au cours de la première année d'enregistrement de l'activité séismique, entre les mois de septembre 1994 et août 1995, 778 événements séismiques ont été enregistrés dont 699 furent localisés (Côté et Plouffe, 1996). L'événement le plus important avait une valeur de magnitude de 3.5 m_N, le 16 juin 1995 à 15;59 H.A.E., et provenait du chantier 2502 EA, de la zone M. Ce dernier événement est, entre autre, la raison pourquoi cette zone a obtenu une attention spéciale méritant un rapport particulier car il est le plus important événement séismique généré à la mine Sigma depuis son ouverture.

Au cours de la période étudiée, plusieurs observations ont pu être faites au sujet de l'activité séismique de la zone M:

- La zone M génère une moyenne mensuelle de 30 événements séismiques, soit la moitié de l'activité séismique de l'ensemble de la mine Sigma. Cela est consistant avec le fait que la moitié du minerai extrait, de la région du puits #3, provenait des chantiers de la zone M;

- Au cours de l'année, 4 séquences d'activité séismique importante, de par le nombre d'événement, ont eu lieu. Elles ont toujours correspondu avec un événement de valeur de magnitude important (> 1.5 m_N). Trois périodes d'inactivité séismique sont présentes dont une précédant de 8 jours les événements du 16 juin 1995. L'activité séismique se produit plus souvent à partir du mercredi au samedi;

- La distribution horaire montre que la moitié des événements se produisent au cours des périodes où aucun employé de la mine Sigma se trouve sous-terre. Le reste se divise également entre les deux quarts de travail. Six périodes particulières se démarquent avec une activité séismique plus importante, dont cinq seraient reliées avec les sautages de production ou les sautages secondaires;

- Huit chantiers ont été exploités au cours de la période. Cinq de ces chantiers montrent une affinité certaines entre l'exploitation et l'activité séismique de ceux-ci. Le chantier 2802 E2A, avec 129 événements séismiques, a été le plus séismiquement actif;

- La séquence du 16 au 21 juin 1995 qui a débuté avec l'événement de magnitude 3.5 m_N semble avoir été précédée par deux précurseurs potentiels: l'éclatement des piliers des points de soutirage du niveau 24 et une période d'absence de l'activité séismique qui a duré 13 jours. L'événement de magnitude 3.5 m_N se produisit suite au sautage de la première volée long-trou dans un sous-niveau du chantier 2502 EA. Au cours des 48 heures suivant cet événement, une activité séismique importante (19 événements) se répercuta de haut en bas de la zone M, pour s'interrompre complètement le 18 juin. Le 21 juin, douze événements, dont un événement de magnitude 2.2 m_N, se produisirent de l'autre côté du travers-banc par rapport aux événements du 16-17 juin.

- Sur 364 événements localisés, le quart avait une valeur de magnitude inférieure à la limite détectable du système, soit -1.5 m_N. Cent vingt-sept événements (35%) avaient une valeur supérieure à 0.0 m_N. L'événement le plus important eut lieu le 16 juin et avait une magnitude de 3.5 m_N;

- La libération de l'énergie séismique se distribua régulièrement au cours de l'année, avec 2 sauts importants, les 16 septembre 1994, 16 et 21 juin 1995, sauf pour les mois d'avril et mai 1995 où une inflexion est notée;

- Une étude des vitesses maximales des particules montrent empiriquement que les plus importants événements localisés à la zone M ont dû produire des dommages sérieux;

- La moitié des 22 événements les plus importants, entre décembre 1994 et juin 1995, sont des coups de pilier. L'autre montre un mécanisme focal lié à un déplacement dû à une discontinuité. L'orientation des plans focaux montrent une bonne correspondance entre eux et les directions des contraintes principales.

Les événements séismiques qui se sont produits sur la zone M entre les mois de septembre 1994 et août 1995 ne semblent pas suivre des tendances uniformes. Parfois, pour un chantier, l'activité séismique est étroitement liée au taux d'extraction du minerai, comme c'est le cas pour le chantier 2802 E2A. En d'autres endroits, le type de roche ainsi que la géologie structurale semblent plus contrôler l'état des contraintes. Certains chantiers semblent aussi relâcher ces contraintes de façon régulière et plus souvent (chantier 2802 E2A), alors qu'un chantier comme le 2502 E2A aurait plutôt tendance à accumuler plus de contraintes et à les relâcher plus violemment.

Comparativement aux mines ontariennes, il y a eu beaucoup moins d'événements de forte magnitude. Hedley (1992) mentionne que pour les mines de l'ontario, 5% des événements ont une magnitude supérieure à 3.0 mN. À Sigma, seulement un événement avait une magnitude supérieure à 3.0 mN. Toutefois, cet événement est le plus important à date jamais enregistré à la mine Sigma.

12. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la direction de Placer Dome Canada limitée - Division Mines Sigma pour l'aide fournie au cours de cette étude. La collaboration de tous les employées de la mine Sigma est toujours appréciée, pour leur aide à tous les travaux reliés à l'installation, l'entretien et le fonctionnement quotidien du système séismique.

Les auteurs remercient plus particulièrement M. André Harvey, ingénieur en contrôle de terrain, pour l'aide continuelle apportée à la supervision du système séismique, à l'analyse des données, aux informations fournies sur les conditions de minage de la zone M et de la mine Sigma et autres sujets, ainsi qu'à la bonne entente existant entre eux.

De plus, les auteurs remercient leurs collègues du Groupe de recherche sur les coups de toit sans qui tout ce travail aurait été plus difficile, et Mme Yannick Chevrier-Bédard, analyste séismique stagiaire.

13. Références

Aki, K. et Richards, P.G., 1980. "Quantitative Seismology: Theory and Methods, Vol. 1", W.H. Freeman and Co., San Francisco, 557 p.

Arjang, B., 1994. "Determination of pre-mining stresses and in situ rock deformation at the Sigma Mine, Val-d'Or, Québec", Rapport commercial MRL94-010(CL), CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada.

Boore, D.M. et Atkinson, G.M., 1987. "Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America", Bull. Seism. Soc. Am. **77**, 470-467.

Blake, W. et Cuvelier, D.J., 1988. "Developing reinforcement requirements for rockburst conditions at Hecla's Friday Mine", Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, 589-598.

Cook, N.G.W., 1963. "The seismic location of rockbursts", In Rock Mechanics, Proceedings of the Fifth Symposium on Rock Mechanics, Pergamon Press, New York, pp. 493-516.

Côté, M. et Plouffe, M., 1996. "Rapport annuel: Compilation de la séisicité induite, Mine Sigma, Val d'Or, Québec, Septembre 1994 - Août 1995", Rapport commercial MMSL96-004(CL), CANMET, Ressources naturelles Canada.

Ebel, J.E., 1982. "M_L measurements for northeastern United States earthquakes", Bull. Seism. Soc. Am. **72**, 1367-1378.

Gagnon, L.-P., Plouffe, M. et Côté, M., 1994. "Analyse de l'activité séismique à la mine Sigma, Val d'Or, Québec, Décembre 1992 - Avril 1994", Rapport de division MRL94-019(TR), CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada.

Ge, M. et Mottahed, P., 1993. "An automatic data analysis and source location system (ADASLS)", Rockbursts and Seismicity in Mines, R.P.Young (ed.), p.343-347.

Geuer, J.W. et Hasegawa, H.S., 1981. "A Model for P-Wave Nodal Solutions", Canadian Journal of Earth Sciences, **18**, pp. 818-823.

Gutenberg, B. et Richter, C.F., 1956. "Magnitude and energy of earthquakes", Ann. Geofis. **9**, 1-15.

Hasegawa, H.S., 1983. "Lg spectra of local earthquakes recorded by the eastern Canada telemetered network and spectral scaling", Bull. Seism. Soc. Am. **73**, 1041-1061.

Hedley, D.G.F., 1988. "Historical review of rockbursts in Ontario Mines", Rapport de division MRL88-28, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada.

Hedley, D.G.F., 1990. "A Five-year Review of the Canada-Ontario-Industry Rockburst Project", Rapport spécial SP90-4E, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada.

Hedley, D.G.F., 1992. "Rockburst Handbook for Ontario Hardrock Mines", Rapport spécial SP92-1E, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada.

Holmberg, R., et Persson, P.-A., 1980. "Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage", Transactions IMM, January, A37-A40.

Horner, R.B. et Hasegawa, H.S., 1978. "The seismotectonics of southern Saskatchewan", Canadian Journal of Earth Sciences, **15**, 1341-1355.

Jaeger, J.C. et Cook, N.G.W., 1971. "Fundamentals of Rock Mechanics", Chapman and Hall Ltd., London, 515 p.

Labrie, D, 1994. "Investigations géomécaniques et propriétés des matériaux rocheux à la mine Sigma", Rapport commercial MRL94-002(CL), CANMET, Énergie, Mines et Ressouces Canada.

Lacroix, R. et Harvey, A., 1993. "Sommaire de l'exploitation minière - Les Mines Sigma (Québec) Limitée", Présentation à la Journée d'échanges en contrôle de terrain de l'Association minière du Québec.

Lenhardt, W.A., 1988. "Seismic damage studies at a deep level African gold mine", Proc. 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, 555-567.

Les Mines Sigma (Québec) Limitée, 1992. "Données générales sur les Mines Sigma (Québec) Limitée".

Nuttli, O.W., 1973. "Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America", J. Geoph. Res. **78**, 876-885.

Robert, F., Brown, A.C., et Audet, A.J., 1983. "Structural control of gold mineralization at the Sigma mine, Val-d'Or, Québec", CIM Bulletin **76**, 72-80.

APPENDICE A

Localisations et valeurs de magnitudes des événements séismiques localisés dans la zone M, pour la période de septembre 1994 à août 1995

Note: Les numéros attribués, renouvelés pour chaque mois, aux événements localisés se retrouvent sur les sections longitudinales de l'Appendice B

EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
1	Sep15153.533	5489	5463	11288	−0.1
2	Sep15165.901	5460	5486	11262	−0.1
3	Sep15180.825	5738	5220	10694	−1.2
4	Sep16030.139	5748	5627	11726	0.9
5	Sep16064.445	5927	5499	11399	0.9
6	Sep16121.433	5741	5392	11031	2.4
7	Sep16121.443	5720	5371	10973	0.4
8	Sep16121.446	5794	5354	11018	1.0
9	Sep16121.455	5697	5366	10894	−3.5
10	Sep16121.459	5825	5379	11007	−3.5
11	Sep16121.513	5788	5360	10997	−3.5
12	Sep16143.637	5762	5261	11098	1.0
13	Sep16154.553	5761	5322	11053	0.8
14	Sep16160.745	5491	5520	11231	−0.2
15	Sep16160.816	5518	5523	11210	0.0
16	Sep17043.648	4963	4887	10661	−0.2
17	Sep17205.444	5940	5421	11197	0.1
18	Sep17225.452	5634	5644	11768	1.6
19	Sep19202.246	5939	5488	11419	−3.5
20	Sep19234.507	5564	5455	11281	0.4
21	Sep20161.130	5011	5037	10777	−1.0
22	Sep21221.346	4956	5049	10783	−0.7
23	Sep22075.740	5488	5532	11205	−0.6
24	Sep22232.425	4968	4875	10660	−3.5
25	Sep28080.407	5488	5510	11256	−1.1
1	Oct11194.104	5594	5485	11282	0.7
2	Oct14025.603	5378	5475	11258	0.9
3	Oct18160.721	5392	5474	11272	1.1
4	Oct25005.039	5457	5492	11267	0.6
5	Oct26204.534	5537	5637	11751	−0.1
6	Oct27003.750	5495	5531	11248	−1.0
7	Oct27070.211	5555	5619	11745	−0.8
8	Oct27074.501	4903	4832	10671	−3.5
9	Oct29030.110	4877	4823	10657	−3.5
10	Oct30012.210	6013	5750	11858	−3.5
1	Nov01044.224	5455	5475	11288	0.2
2	Nov01223.612	5464	5502	11278	0.3
3	Nov02042.845	5499	5492	11300	0.0
4	Nov02042.933	5451	5505	11309	0.6
5	Nov02042.936	5439	5509	11274	−0.1
6	Nov02043.008	5386	5487	11277	0.0
7	Nov02043.010	5457	5496	11281	−0.6
8	Nov03025.219	5458	5503	11288	0.2
9	Nov03040.046	5475	5509	11270	−3.5
10	Nov03051.553	5456	5494	11286	−0.6

EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
11	Nov03184.307	5548	5554	11697	−3.5
12	Nov03193.356	5453	5532	11249	−3.5
13	Nov04030.243	5479	5555	11218	−3.5
14	Nov04030.312	5461	5531	11270	−3.5
15	Nov04030.333	5469	5506	11266	−3.5
16	Nov04030.535	5444	5489	11292	−3.5
17	Nov04035.445	5471	5536	11214	−3.5
18	Nov07232.213	5468	5500	11277	0.8
19	Nov09160.349	5016	5055	10779	−3.5
20	Nov09170.419	5491	5518	11298	−0.1
21	Nov11181.609	5428	5506	11215	−3.5
22	Nov12031.403	5495	5529	11240	−3.5
23	Nov12042.537	4999	5028	10776	−0.7
24	Nov12064.925	5497	5524	11242	−3.5
25	Nov13001.107	5587	5502	11292	0.5
26	Nov13013.016	5492	5568	11215	−3.5
27	Nov14193.127	5140	4897	10676	0.7
28	Nov15161.553	4956	5033	10778	−3.5
29	Nov15181.157	4964	5040	10778	−1.0
30	Nov16072.251	5479	5462	11306	0.9
31	Nov17031.920	5484	5507	11277	0.1
32	Nov19180.626	5310	5714	11834	0.3
33	Nov19183.509	5316	5687	11881	0.0
34	Nov21155.359	5015	5051	10780	−1.0
35	Nov21170.443	5592	5480	11280	1.6
36	Nov21170.614	5586	5494	11281	−0.3
37	Nov21171.720	5568	5454	11295	0.4
38	Nov21171.928	5591	5492	11286	0.2
39	Nov21172.448	5574	5489	11284	0.0
40	Nov21183.651	5503	5491	11285	1.1
41	Nov21192.108	5591	5504	11351	0.8
42	Nov21192.111	5586	5501	11356	−1.0
43	Nov22020.802	5594	5528	11374	0.6
44	Nov22020.804	5598	5517	11368	−0.7
45	Nov22021.232	5586	5532	11333	1.2
46	Nov22024.445	5604	5491	11380	−1.0
47	Nov22170.243	5576	5467	11280	0.2
48	Nov24155.239	5448	5527	11265	−0.8
49	Nov24165.400	6012	5202	10760	−3.5
50	Nov27132.024	5464	5491	11287	−0.5
51	Nov27135.234	6303	5593	11234	−0.5
52	Nov28161.944	5369	5474	11267	0.5
53	Nov28195.927	5598	5482	11275	0.7
54	Nov29183.335	5388	5483	11281	0.0
55	Nov30182.607	5377	5487	11268	0.4

EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
3	Dec16195.513	5032	4923	10663	−1.0
4	Dec19061.853	6075	5188	10739	−3.5
5	Dec23152.632	5447	5491	11285	1.0
6	Dec23152.711	5526	5488	11287	−0.2
7	Dec23153.757	4986	5051	10772	−3.5
8	Dec25150.306	4988	5030	10782	−0.7
9	Dec31032.448	4966	4860	10661	−1.0
1	Jan05031.718	5437	5519	11276	0.5
2	Jan05155.822	5440	5495	11287	−0.3
3	Jan05155.842	5461	5530	11253	−0.4
4	Jan06064.613	4949	5034	10776	−0.1
5	Jan06143.802	4955	4891	10667	−3.5
6	Jan07043.824	5482	5548	11218	0.5
7	Jan07045.338	4960	4880	10662	−3.5
8	Jan07053.017	5396	5477	11291	0.6
10	Jan09161.711	5470	5497	11281	0.0
11	Jan10030.958	5500	5527	11238	−3.5
12	Jan10034.318	5506	5500	11288	−0.5
13	Jan10090.520	5466	5500	11286	0.9
14	Jan10172.647	5585	5508	11345	0.1
15	Jan11042.603	4964	4881	10667	−1.2
16	Jan11150.857	5450	5519	11269	−0.6
17	Jan11161.724	4912	4857	10672	−0.6
18	Jan13010.458	5607	5483	11283	0.9
19	Jan13025.711	5458	5520	11278	0.5
22	Jan13203.612	5554	5464	11306	0.2
23	Jan14025.247	5497	5486	11292	0.2
24	Jan17034.301	5543	5486	11293	0.1
26	Jan18031.936	5558	5488	11278	1.2
27	Jan18031.953	5580	5500	11303	0.7
28	Jan18032.033	5504	5509	11280	−0.5
29	Jan19035.509	5431	5507	11275	0.1
30	Jan20030.812	5504	5526	11279	−3.5
31	Jan20055.337	5532	5528	11284	0.5
32	Jan20100.131	5526	5532	11207	−3.5
33	Jan20131.547	5028	5676	11761	0.1
34	Jan21030.329	5826	5670	11783	−0.6
35	Jan22130.423	5295	5268	10966	−3.5
36	Jan23134.218	5517	5557	11498	−3.5
37	Jan23195.732	5507	5541	11233	−0.1
38	Jan26061.545	5438	5528	11259	−0.5
39	Jan27182.057	5386	5474	11288	−0.6
40	Jan28025.827	5749	5641	11808	1.2
41	Jan30203.700	5605	5472	11286	0.4
1	Feb01030.814	5453	5492	11292	0.9

EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
2	Feb01032.732	5450	5509	11285	−1.0
3	Feb01032.759	5442	5514	11296	−0.6
4	Feb01033.214	5463	5515	11290	0.4
5	Feb01033.556	5423	5545	11236	−1.0
6	Feb01084.457	5440	5485	11191	−3.5
7	Feb01110.829	5367	5465	11279	0.9
8	Feb02102.629	4662	5514	12056	−0.6
12	Feb07031.407	5080	5076	10793	−1.0
13	Feb07033.257	5094	5042	10780	0.1
14	Feb07235.043	5072	5071	10793	−0.1
15	Feb11063.216	5122	4998	10677	−1.1
16	Feb11063.439	5119	4999	10669	−0.2
17	Feb17160.209	5437	5510	11270	1.4
18	Feb20184.940	5919	5238	10726	−3.5
20	Feb23172.429	5590	5475	11279	1.2
21	Feb25232.424	6070	5184	10759	−3.5
22	Feb26001.433	5555	5617	11787	−0.1
23	Feb26051.617	5121	4986	10666	−3.5
24	Feb26101.103	5474	5676	11852	0.1
25	Feb26213.830	5109	5625	11800	0.4
27	Feb27155.607	5458	5522	11275	−1.0
28	Feb27161.157	5458	5547	11236	−1.0
29	Feb28162.741	6058	5197	10765	−1.0
30	Feb28192.735	5594	5677	11782	−0.1
31	Feb28232.037	6012	5186	10732	−0.7
32	Feb28232.039	6043	5203	10737	−0.7
1	Mar01012.613	6054	5201	10752	−3.5
2	Mar01015.344	6073	5170	10749	−0.6
3	Mar05181.638	5464	5615	11801	0.1
4	Mar07051.219	6098	5149	10761	−1.0
5	Mar08180.822	5536	5598	11760	1.0
6	Mar08180.905	5553	5561	11791	−0.3
7	Mar08184.648	5559	5652	11810	−0.7
8	Mar09071.537	5572	5492	11294	1.4
9	Mar09071.540	5535	5443	11283	−0.1
10	Mar09071.542	5574	5503	11250	−1.0
11	Mar09071.544	5590	5476	11308	−0.5
12	Mar09071.611	5513	5492	11314	−0.4
13	Mar09082.031	5473	5531	11276	−0.1
14	Mar09084.302	5600	5457	11301	−0.6
16	Mar10160.820	6087	5208	10745	1.1
18	Mar11090.708	5552	5476	11287	0.5
19	Mar11091.526	5570	5476	11318	−0.2
21	Mar14160.930	6113	5207	10772	−0.8
22	Mar15000.902	5119	4907	10691	0.3

EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
23	Mar15002.535	5134	4896	10670	−0.7
24	Mar15013.649	6096	5217	10734	−1.0
25	Mar16171.833	5036	5078	10798	−0.6
26	Mar17041.927	5121	5000	10681	−1.0
29	Mar18032.055	5929	5618	11781	−0.7
32	Mar22222.134	5028	5073	10799	−0.8
33	Mar22222.445	5115	4990	10674	−1.0
35	Mar25143.531	5105	4995	10661	−3.5
37	Mar26063.554	5546	5609	11786	−0.8
38	Mar26171.601	5640	5641	11773	−0.5
39	Mar31143.851	5779	5323	11044	0.2
1	Apr04175.732	5012	4944	10656	−3.5
2	Apr08025.331	5496	5539	11242	−1.0
3	Apr08025.524	5490	5510	11298	−0.7
4	Apr08030.441	5472	5557	11244	−3.5
6	Apr10083.705	5054	4986	10583	−1.0
7	Apr10193.543	5126	5022	10659	−3.5
8	Apr11025.103	5009	5027	10786	−0.5
9	Apr12031.033	4960	5056	10779	−3.5
10	Apr12034.300	6110	5178	10764	0.7
11	Apr12231.330	5588	5479	11295	−0.7
12	Apr13162.521	4954	5056	10788	−1.3
13	Apr14100.514	5680	5611	11803	0.2
14	Apr15112.704	5969	5698	11959	−1.0
15	Apr18051.020	5875	5123	10788	−1.0
16	Apr19030.254	4956	4894	10682	−0.9
17	Apr19030.322	4956	4930	10668	−3.5
18	Apr19121.804	5762	5540	11927	−1.3
19	Apr20020.520	5076	5077	10797	−1.1
20	Apr21155.225	5060	5070	10804	1.0
21	Apr21155.246	5086	5022	10780	−3.5
22	Apr21155.412	5070	5095	10807	−1.2
23	Apr21160.014	5060	5083	10808	−0.7
24	Apr21161.606	5034	5090	10792	−3.5
25	Apr21225.750	5856	5623	11738	−1.0
27	Apr27033.821	5554	5615	11790	1.5
28	Apr27042.820	5683	5611	11854	−0.8
29	Apr27042.823	5658	5584	11793	−0.6
31	Apr30030.851	6122	5658	11220	−0.6
32	Apr30052.703	5770	5617	11865	0.1
1	May01101.115	5710	5599	11857	−0.8
2	May02175.059	4906	4856	10665	−1.1
3	May03032.350	5526	5509	11301	−0.6
4	May03082.904	6119	5183	10750	−1.2
5	May03113.536	5867	5395	11037	−0.7

EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
6	May07201.057	5849	5609	11711	−0.1
7	May08023.945	5466	5546	11196	−0.7
8	May08080.442	5410	5565	11974	−0.2
9	May12160.453	5500	5515	11302	−0.7
10	May12160.642	5495	5492	11337	−1.2
11	May12161.122	5344	5455	11246	−0.2
12	May12161.511	5392	5514	11318	−1.0
13	May12164.539	5314	5434	11236	0.2
14	May12210.539	4938	4874	10663	−3.5
15	May13040.713	5100	4989	10677	−3.5
16	May13112.323	5593	5498	11286	−0.4
17	May13175.138	5729	5573	11859	−0.7
18	May15040.828	5553	5638	11798	−1.0
19	May15131.010	6059	5190	10751	−1.0
22	May17180.940	5100	5626	12208	−0.5
23	May18210.834	4557	5591	11684	−0.6
24	May18233.621	6065	5155	10730	0.0
26	May19101.815	5591	5570	11386	−1.2
27	May21034.634	5303	5201	10979	1.1
28	May21035.116	5304	5204	10987	0.6
29	May22114.906	5256	4957	10592	−0.8
30	May22193.815	5356	5302	11201	−0.5
31	May22193.817	5333	5323	11169	−1.1
32	May26002.752	5288	5357	11197	−3.5
1	Jun08140.418	5665	5611	11793	−0.5
2	Jun10024.111	4370	5555	11814	−0.8
3	Jun10024.509	4950	5054	10771	−0.7
4	Jun10024.552	4944	5040	10773	−3.5
5	Jun10024.650	4950	5048	10779	−0.1
6	Jun10025.307	4950	5057	10782	−3.5
7	Jun10031.004	4948	5056	10795	−1.4
8	Jun10193.503	4993	5067	10803	−0.8
9	Jun11015.851	5663	5620	11784	0.2
10	Jun12202.904	4951	5064	10784	−3.5
11	Jun14043.130	5564	5495	11310	−0.7
12	Jun15125.607	5937	5136	10657	−0.1
13	Jun16155.932	5513	5654	11812	3.5
18	Jun16172.219	5375	5671	11808	1.5
19	Jun16173.041	5313	5643	11832	1.2
20	Jun16174.022	5482	5602	11624	−0.7
22	Jun17004.923	5430	5660	11820	−1.2
23	Jun17005.036	5007	5589	11804	−0.1
24	Jun17014.331	6287	5800	11600	0.7
25	Jun17021.032	5137	5556	11810	−0.2
26	Jun17052.546	5805	5554	11437	0.1

EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
27	Jun17052.551	5813	5536	11428	−0.2
28	Jun17120.531	5133	5605	11814	−1.0
29	Jun17145.935	5917	5128	10681	0.1
30	Jun17205.423	5588	5477	11288	0.4
31	Jun17210.041	5593	5493	11285	−1.3
32	Jun17223.321	5828	5537	11434	1.0
33	Jun17223.333	5846	5540	11454	−0.2
34	Jun17223.337	5827	5540	11426	−1.1
35	Jun17223.351	5811	5537	11453	−0.7
36	Jun18043.329	5814	5524	11441	−0.6
38	Jun18202.851	5043	5594	11820	−1.1
40	Jun20125.910	5791	5526	11336	0.1
41	Jun21085.927	5040	5669	11805	2.2
42	Jun21085.941	4957	5612	11793	−0.8
43	Jun21090.051	5030	5618	11796	−0.8
44	Jun21090.102	5056	5617	11784	−1.1
45	Jun21090.853	4930	5676	11827	−1.3
46	Jun21092.113	5053	5632	11795	−1.3
47	Jun21092.310	5068	5616	11773	−0.1
48	Jun21113.222	5181	5644	11822	0.1
49	Jun21113.425	5053	5625	11807	−1.0
50	Jun21113.517	5185	5640	11825	0.9
51	Jun21113.520	5222	5643	11809	0.6
52	Jun21123.813	5190	5550	11769	0.8
53	Jun22003.155	5058	5624	11767	−0.1
54	Jun22005.645	4905	5562	11816	−1.0
57	Jun26014.206	5830	5497	11333	0.9
58	Jun26014.238	5841	5484	11333	−0.6
59	Jun26020.957	5853	5516	11355	0.1
1	Jul05155.805	5118	5096	10775	−1.4
2	Jul11030.519	5088	4997	10661	−3.5
3	Jul11031.305	4702	5580	12098	−0.9
4	Jul13213.132	4927	5055	10780	−0.9
5	Jul13213.143	4942	5040	10773	0.7
6	Jul13223.604	5337	5177	10847	−0.3
7	Jul13223.610	5329	5178	10833	0.2
8	Jul14132.827	4977	5063	10816	−3.5
9	Jul14151.504	4840	5543	11976	−0.4
11	Jul14212.849	5348	5195	10870	−0.7
12	Jul18074.944	5065	4969	10670	−3.5
13	Jul18140.113	4862	5523	11931	−3.5
14	Jul19034.614	6026	5191	10758	−3.5
15	Jul19050.246	5207	5558	11827	−3.5
16	Jul19060.556	5109	4985	10625	−3.5
17	Jul19123.031	4956	5036	10803	−3.5

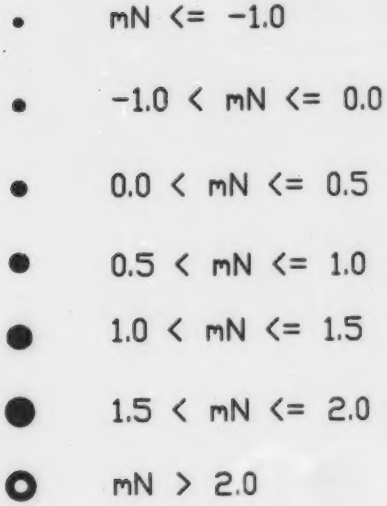
EVENEMENTS SEISMIQUE DE LA MINE SIGMA – ZONE M
SEPTEMBRE 1994 – AOUT 1995

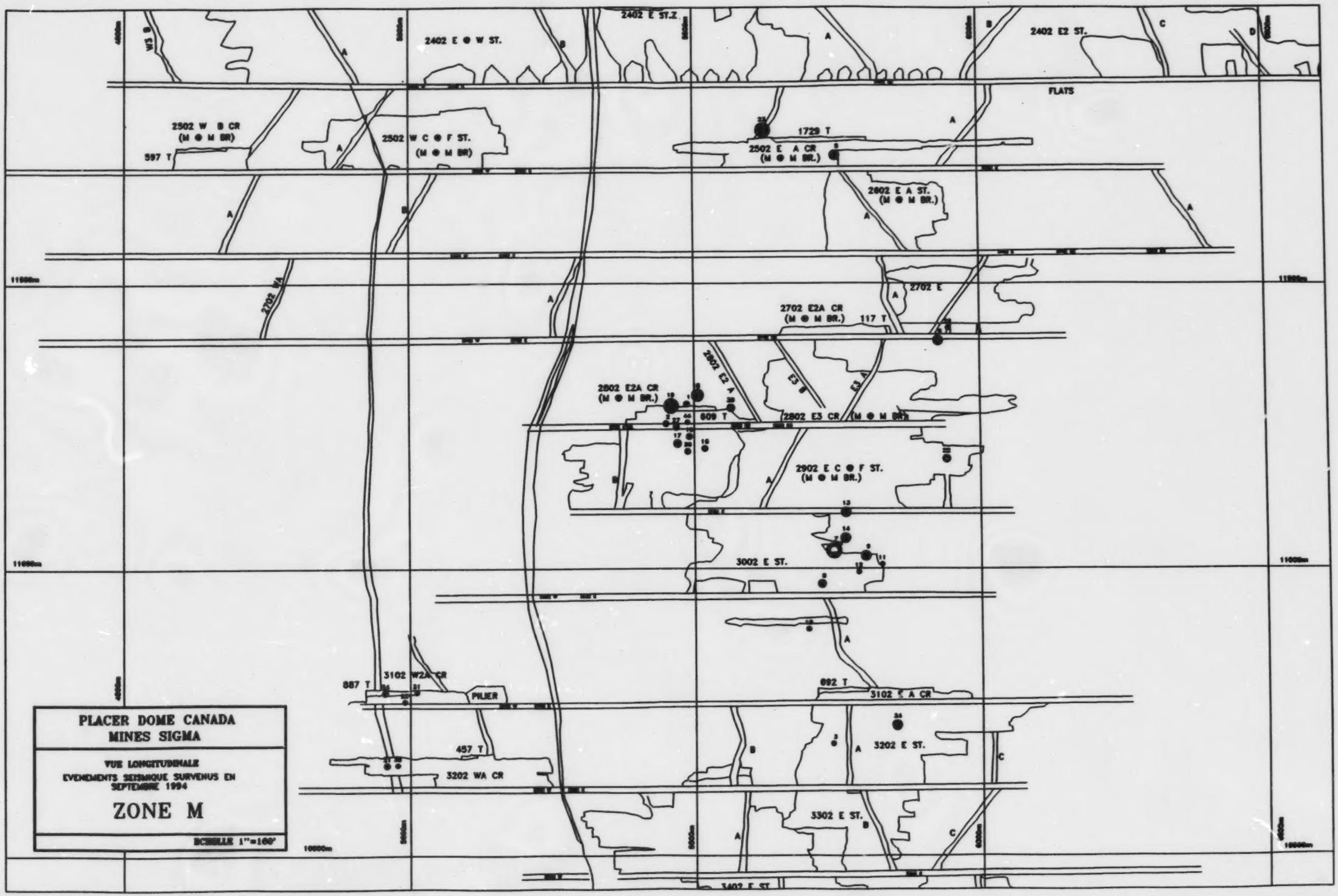
No	NOM	EAST	NORTH	ELEV	Mn
18	Jul20160.852	5069	4992	10671	−3.5
19	Jul20200.315	4901	5622	12164	−1.0
20	Jul22001.023	6040	5197	10676	−1.2
21	Jul22013.920	4845	5533	12002	−3.5
23	Jul24090.006	6047	5176	10717	−3.5
1	Aug01095.640	5196	5614	11782	−1.0
2	Aug10030.610	5011	4930	10677	−1.3
3	Aug10102.726	5022	4963	10650	−1.4
4	Aug11161.224	4985	5051	10804	−3.5
5	Aug11161.234	4992	5050	10800	−3.5
6	Aug12025.629	4996	4944	10654	−3.5
7	Aug12105.627	5000	4967	10661	−1.1
8	Aug12221.701	5025	4963	10664	−3.5
9	Aug13010.745	6046	5159	10708	−3.5
10	Aug14015.249	4994	5035	10813	−3.5
11	Aug14112.506	6103	5210	10761	−1.0
12	Aug14131.216	4996	5016	10791	−1.2
13	Aug16174.204	4951	5074	10774	−3.5
14	Aug17000.812	6117	5193	10754	0.0
15	Aug17000.815	6119	5178	10741	−1.2
16	Aug18145.843	4966	4936	10655	−1.1
17	Aug20114.838	5559	5093	10674	−1.0
18	Aug21032.702	4957	4906	10667	0.0
19	Aug21032.708	4967	4896	10673	−1.0
20	Aug21044.910	4961	4898	10677	−3.5
21	Aug21163.155	4992	5046	10819	−0.6
22	Aug21163.839	5004	5020	10792	−0.6
23	Aug23160.823	4955	5070	10814	−1.2
24	Aug23160.915	4958	4920	10673	−3.5
25	Aug24011.703	4963	5061	10813	−3.5
26	Aug24160.530	4956	4910	10680	−1.0
27	Aug24200.126	4956	5057	10807	−0.7
28	Aug25222.528	4963	5045	10799	−3.5
29	Aug26030.140	4965	4939	10680	−1.2
30	Aug26043.909	4950	5074	10803	−1.1
31	Aug26045.554	4938	5073	10804	−1.4
32	Aug29105.451	4937	5056	10799	−0.7
33	Aug29105.514	4939	5051	10783	−0.9
34	Aug30083.026	4685	5379	9915	−0.9
35	Aug30155.624	4912	4884	10670	−3.5
36	Aug30155.933	4957	4894	10682	−1.4
37	Aug31172.623	4942	5040	10782	−3.5
38	Aug31201.555	4909	4876	10691	−1.4

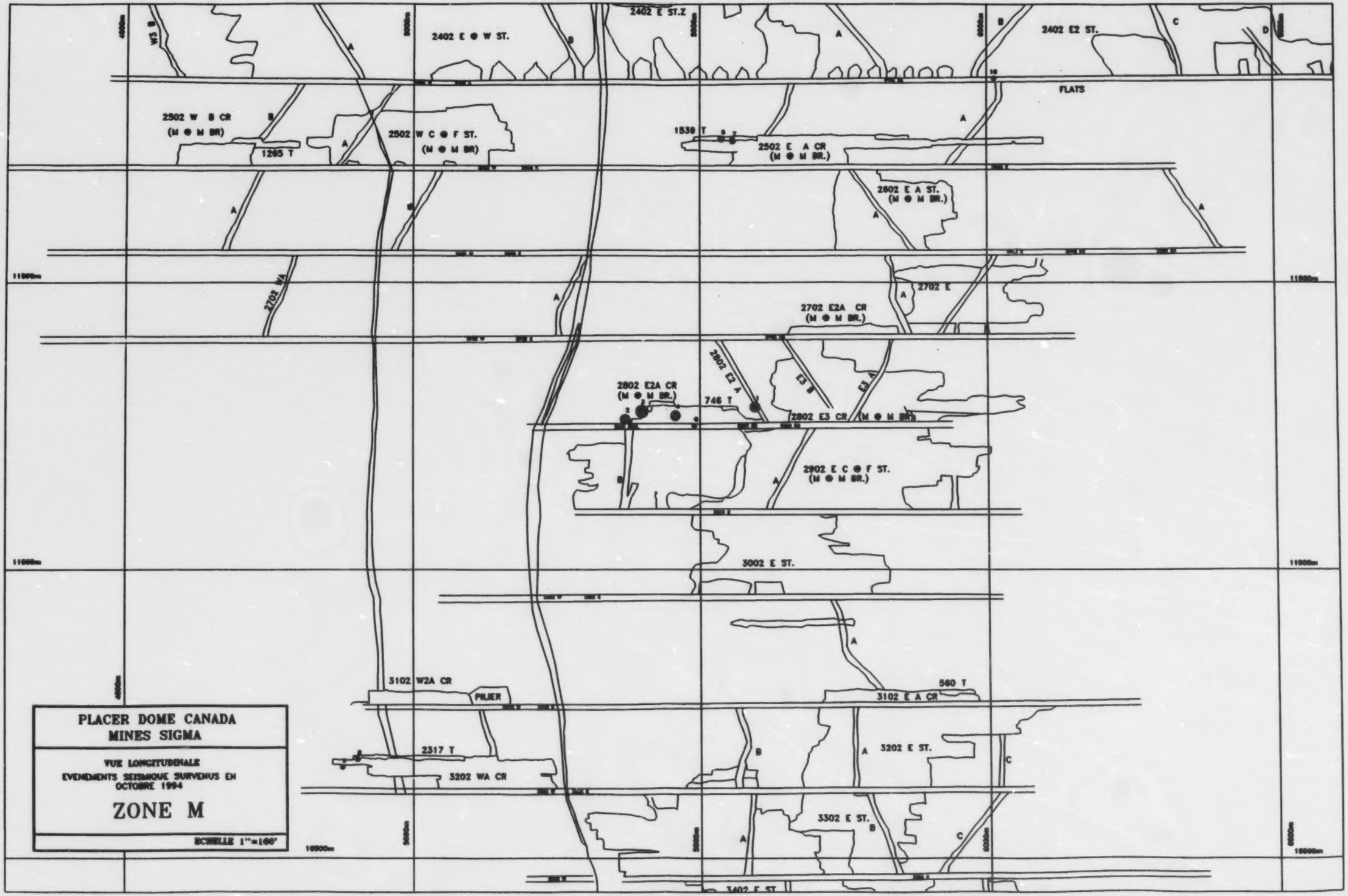
APPENDICE B

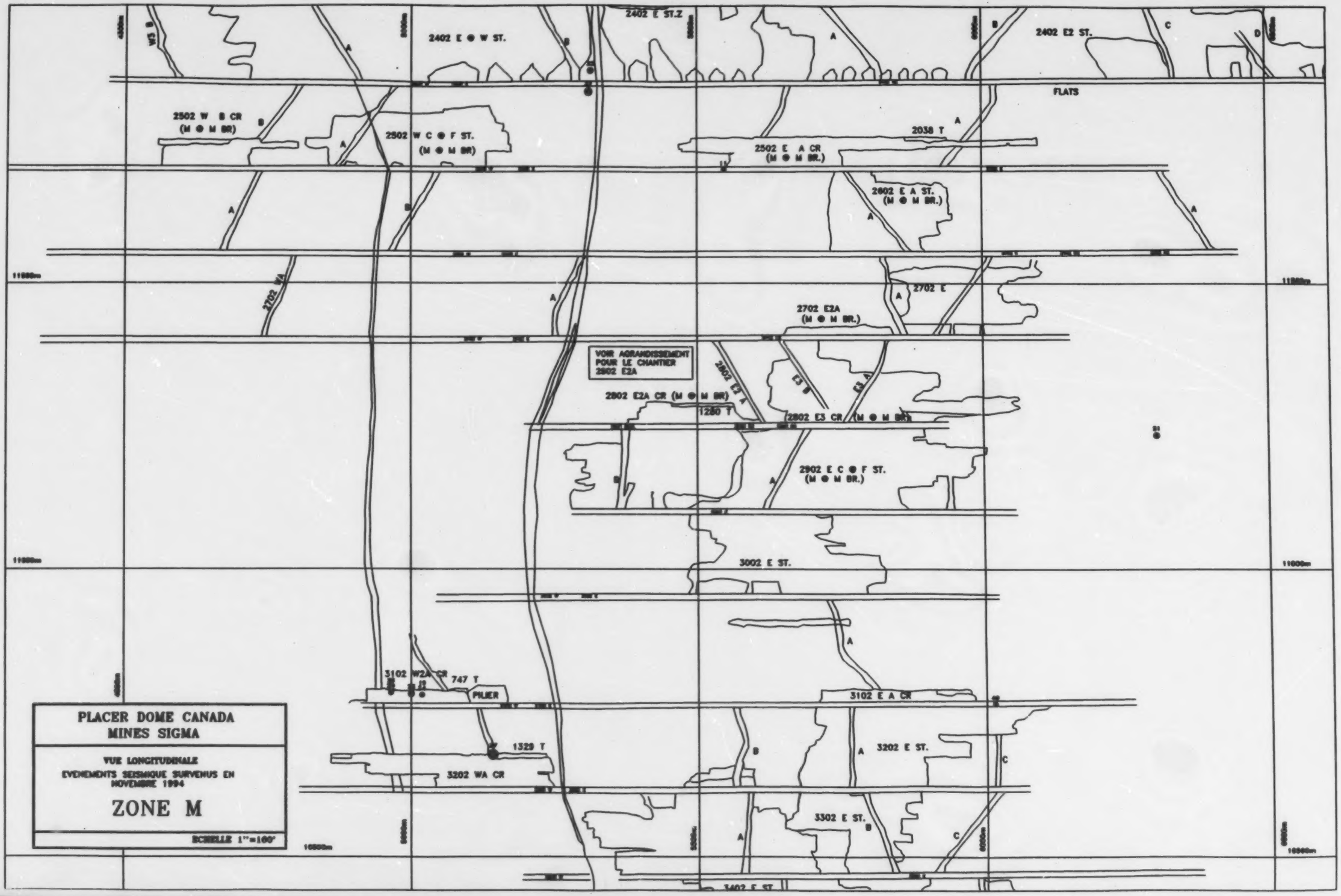
Sections longitudinales de la zone M montrant l'activité séismique mensuelle

SYMBOLES




2402 E ● W ST.
2402 E ST.Z
2402 E2 ST.
FLATS
2502 W B CR
(M ● M BR)
597 T
2502 W C ● F ST.
(M ● M BR)
1729 T
2502 E A CR
(M ● M BR.)
2802 E A ST.
(M ● M BR.)
2702 E
2702 E2A CR
(M ● M BR.)
117 T
2802 E2A CR
(M ● M BR.)
609 T
2802 E3 CR (M ● M BR)
2902 E C ● F ST.
(M ● M BR.)
3002 E ST.
887 T
3102 W2A CR
PILIER
892 T
3102 E A CR
457 T
3202 WA CR
3202 E ST.
3302 E ST.
3402 E ST.
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
SEPTEMBRE 1994
ZONE M
ECHELLE 1"=160'


2402 E ● W ST.
2402 E ST.Z
2402 E2 ST.
FLATS
2502 W B CR
(M ● M BR)
1265 T
2502 W C ● F ST.
(M ● M BR)
1539 T
2502 E A CR
(M ● M BR.)
2602 E A ST.
(M ● M BR.)
2702 WA
2702 E
2702 E2A CR
(M ● M BR.)
2802 E2A CR
(M ● M BR.)
746 T
2802 E2 A
E3 B
E3 A
2802 E3 CR (M ● M BR)
2902 E C ● F ST.
(M ● M BR.)
3002 E ST.
3102 W2A CR
PILIER
580 T
3102 E A CR
2317 T
3202 WA CR
3202 E ST.
3302 E ST.
3402 E ST.
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
OCTOBRE 1994
ZONE M
ECHELLE 1"=100'

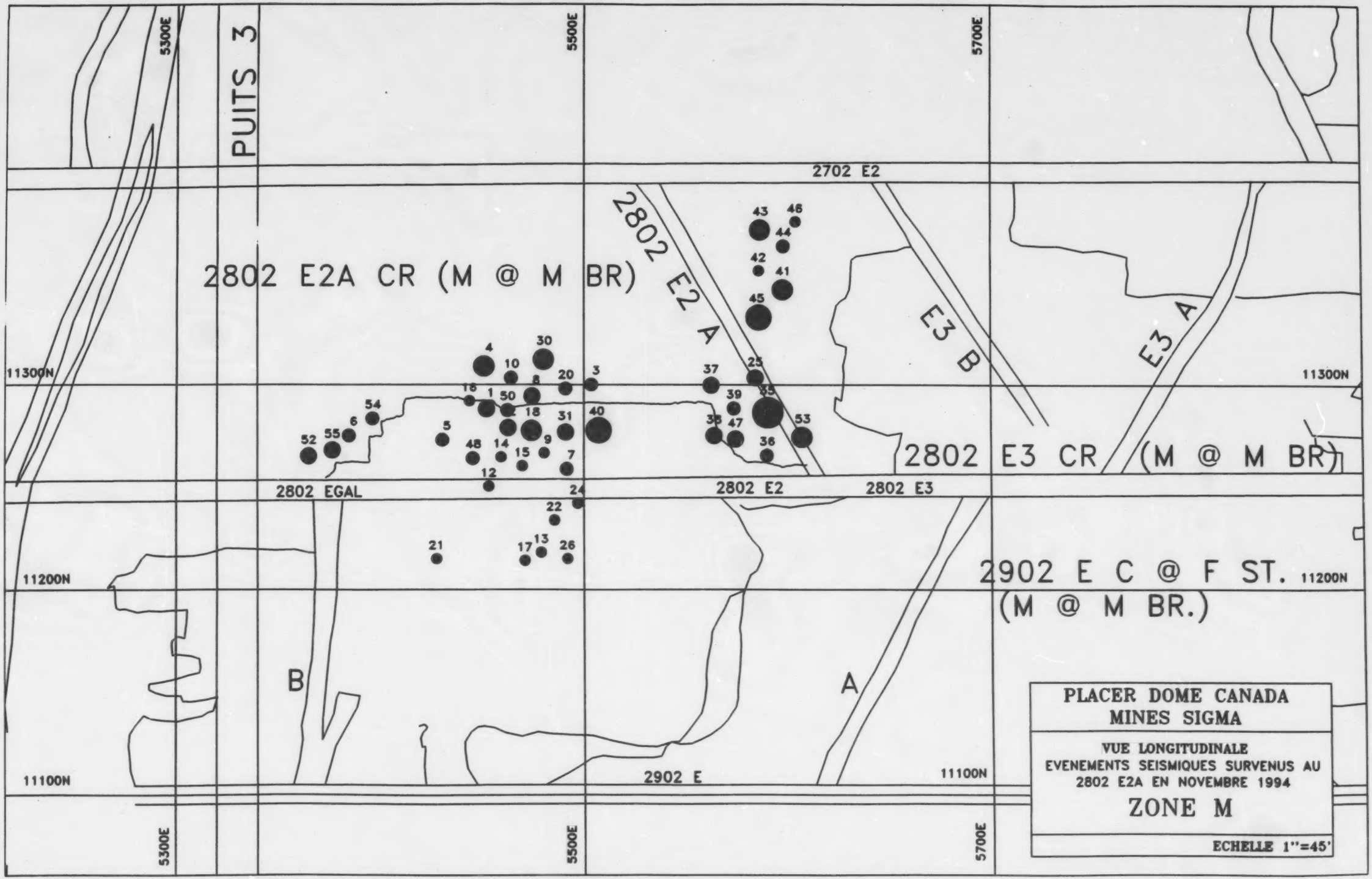


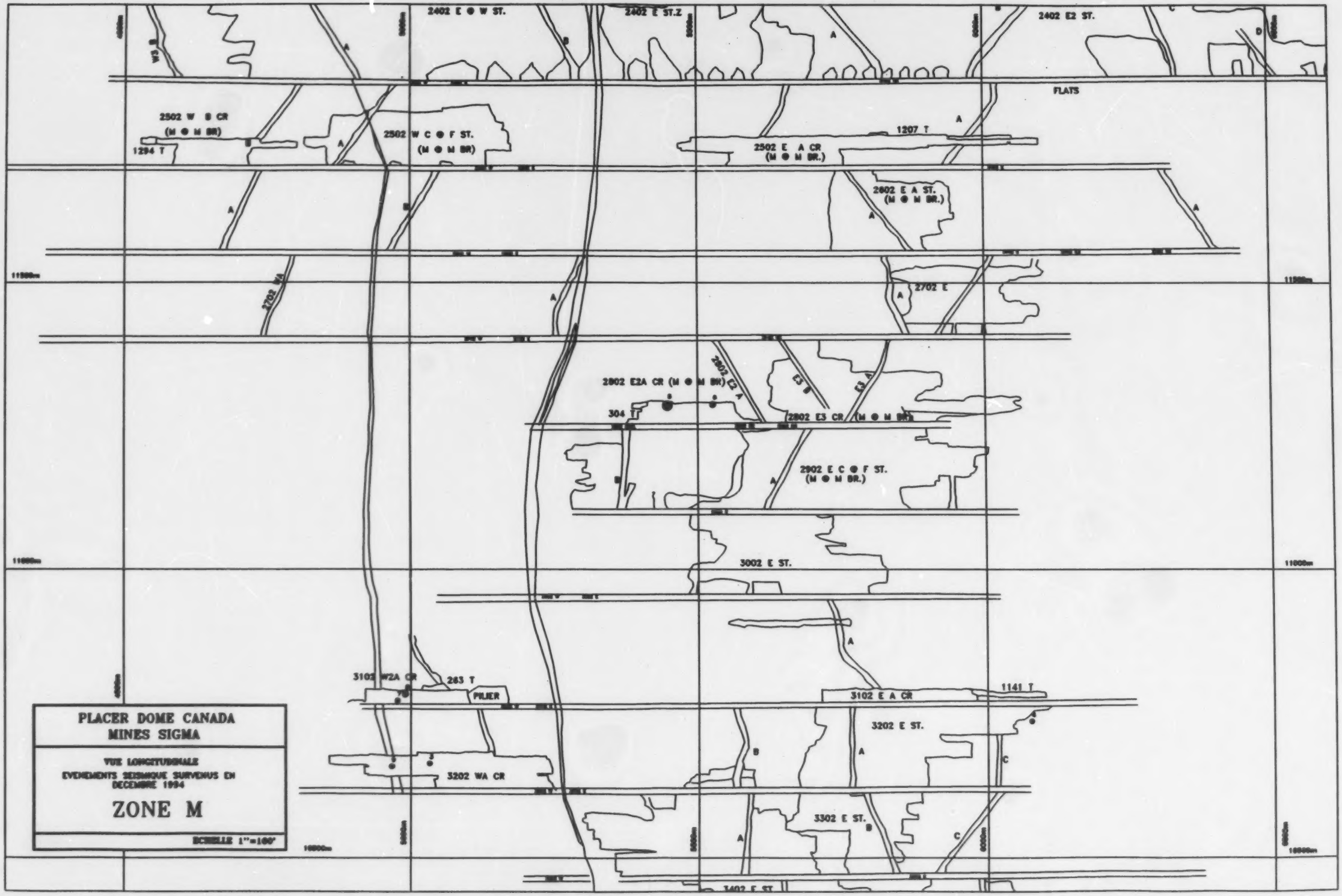
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA

VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
NOVEMBRE 1994

ZONE M

ECHELLE 1"=100'


5300E
PUITS 3
5500E
5700E
2702 E2
2802 E2A CR (M @ M BR)
2802 E2 A
E3 B
E3 A
11300N
2802 E3 CR (M @ M BR)
2802 EGAL
2802 E2
2802 E3
11200N
2902 E C @ F ST. (M @ M BR.)
B
A
11100N
2902 E
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUES SURVENUS AU
2802 E2A EN NOVEMBRE 1994
ZONE M
ECHELLE 1"=45'

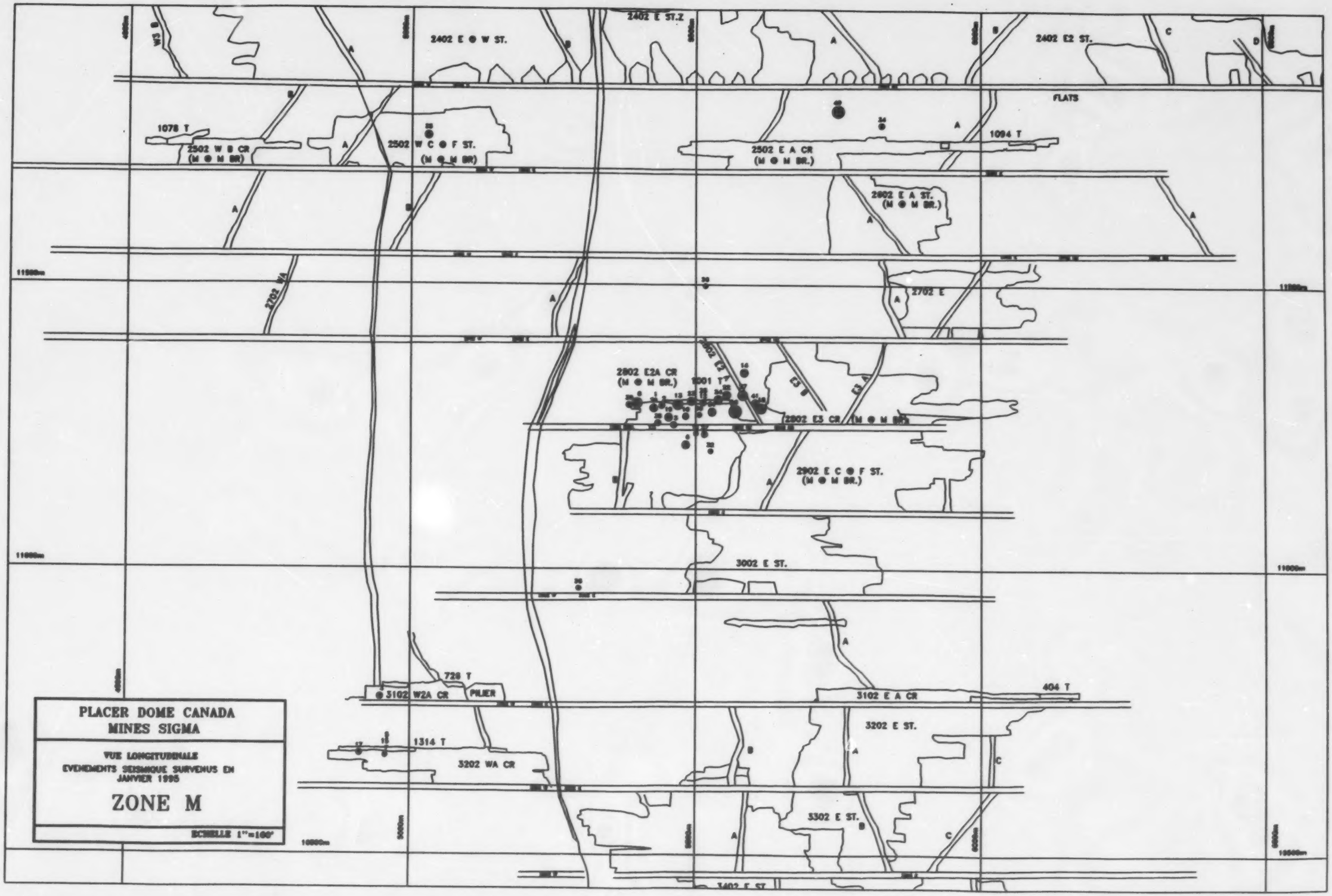


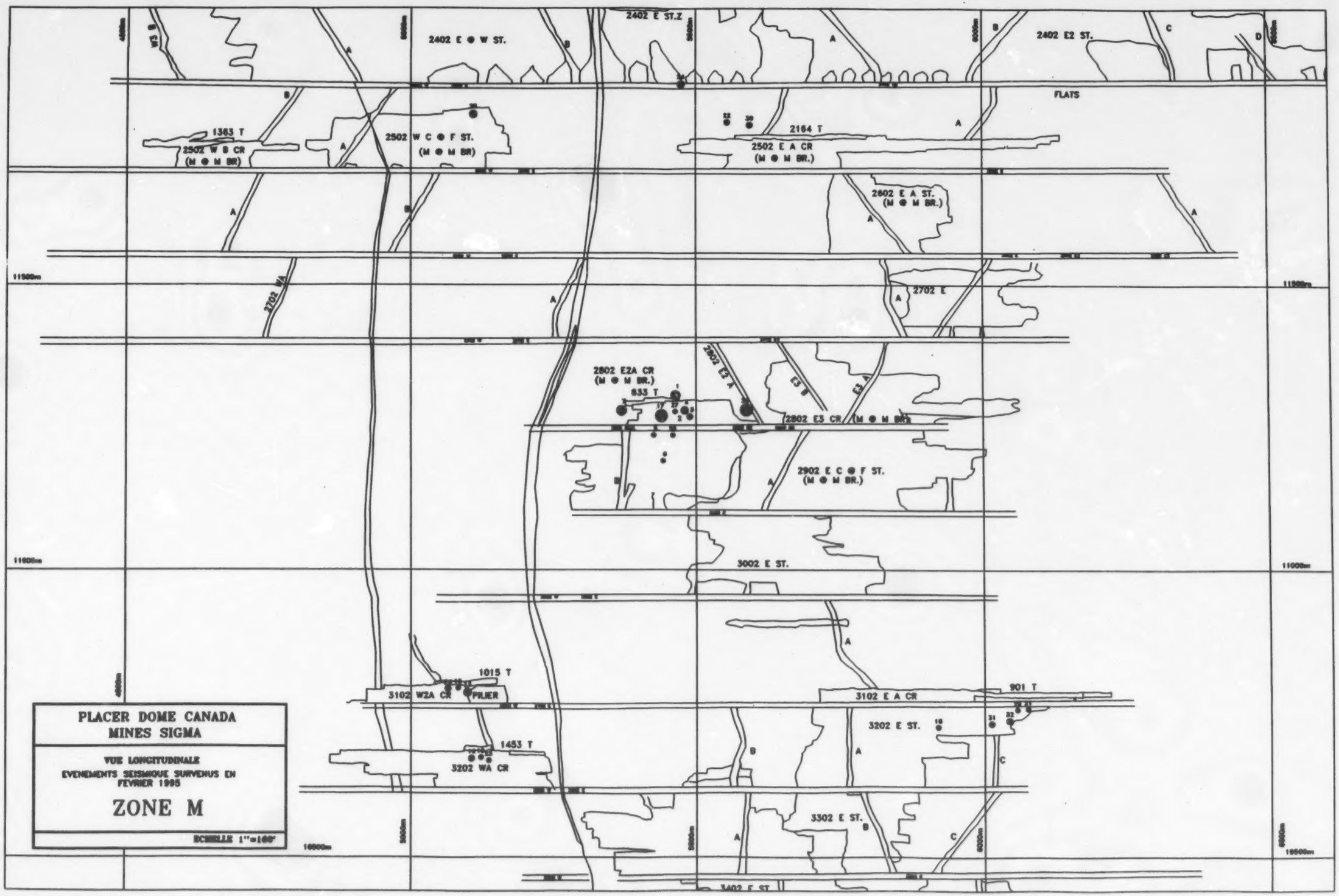
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA

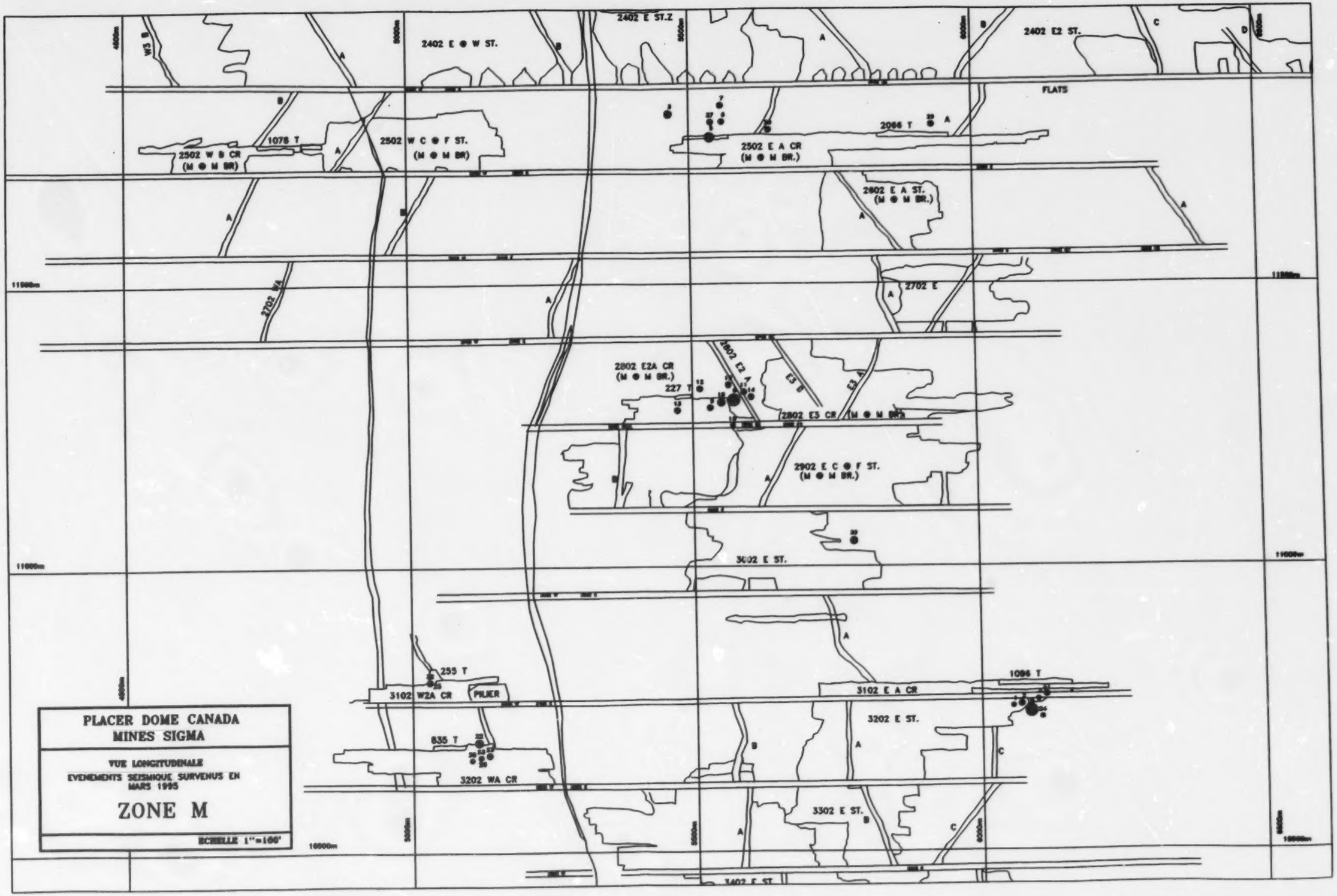
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
DECEMBRE 1994

ZONE M

ECHELLE 1"=100'


2402 E ● W ST.
2402 E ST.Z
2402 E2 ST.
FLATS
1078 T
2502 W B CR
(M ● M BR)
2502 W C ● F ST.
(M ● M BR)
2502 E A CR
(M ● M BR.)
1094 T
2802 E A ST.
(M ● M BR.)
2702 W A
2702 E
2802 E2A CR
(M ● M BR.)
1001 T
2802 E3 CR (M ● M BR)
2902 E C ● F ST.
(M ● M BR.)
3002 E ST.
728 T
● 3102 W2A CR
PILIER
3102 E A CR
404 T
3202 E ST.
1314 T
3202 WA CR
3302 E ST.
3402 E ST.
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
JANVIER 1995
ZONE M
ECHELLE 1"=100'


2402 E ● W ST.
2402 E ST.Z
2402 E2 ST.
FLATS
1363 T
2502 W B CR
(M ● M BR)
2502 W C ● F ST.
(M ● M BR)
2164 T
2502 E A CR
(M ● M BR.)
2602 E A ST.
(M ● M BR.)
2702 WA
2702 E
2802 E2A CR
(M ● M BR.)
833 T
2802 E3 CR (M ● M BR.)
2902 E C ● F ST.
(M ● M BR.)
3002 E ST.
1015 T
3102 W2A CR
PILIER
3102 E A CR
901 T
1453 T
3202 WA CR
3202 E ST.
3302 E ST.
3402 E ST
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
FEVRIER 1995
ZONE M
ECHELLE 1"=100'

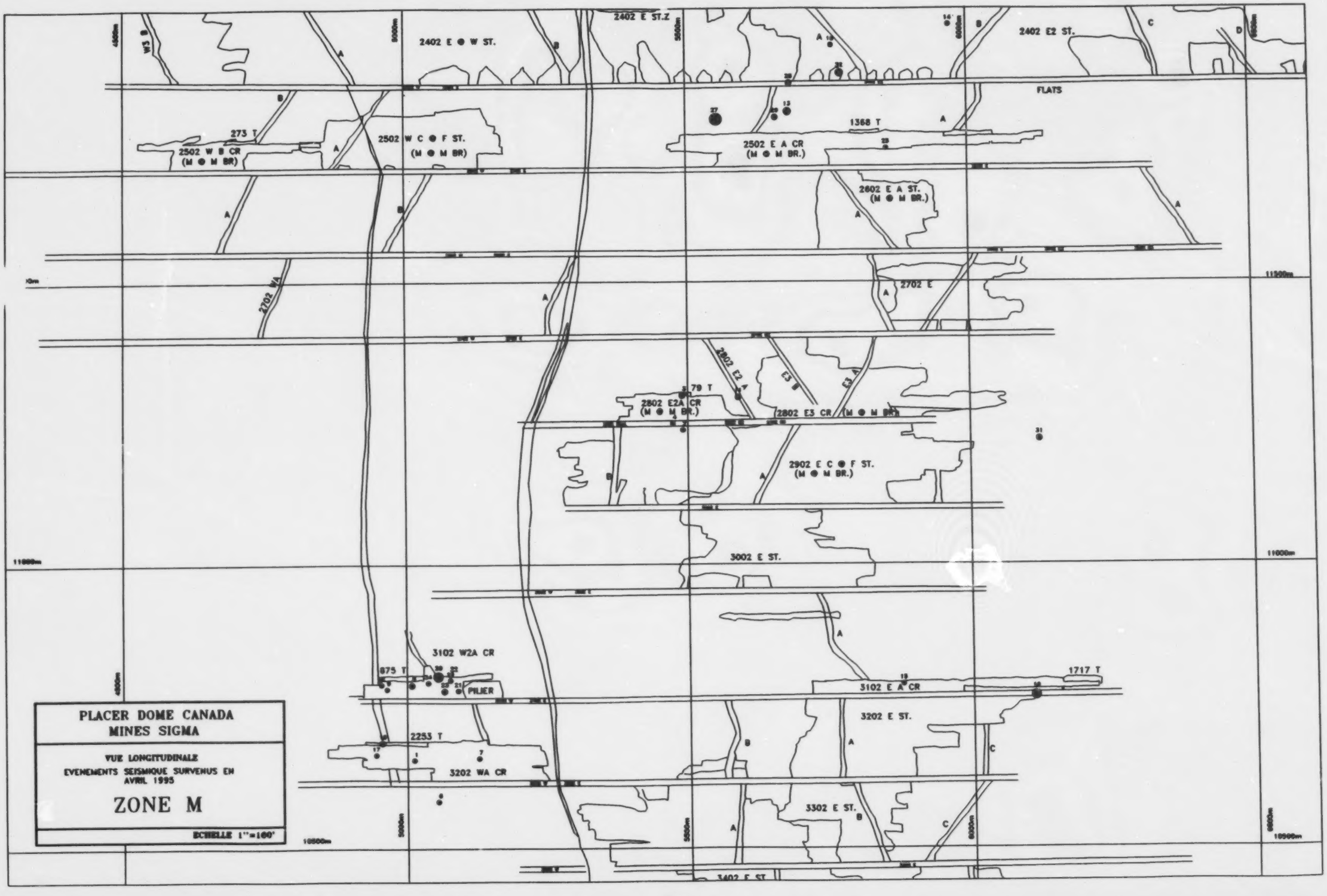


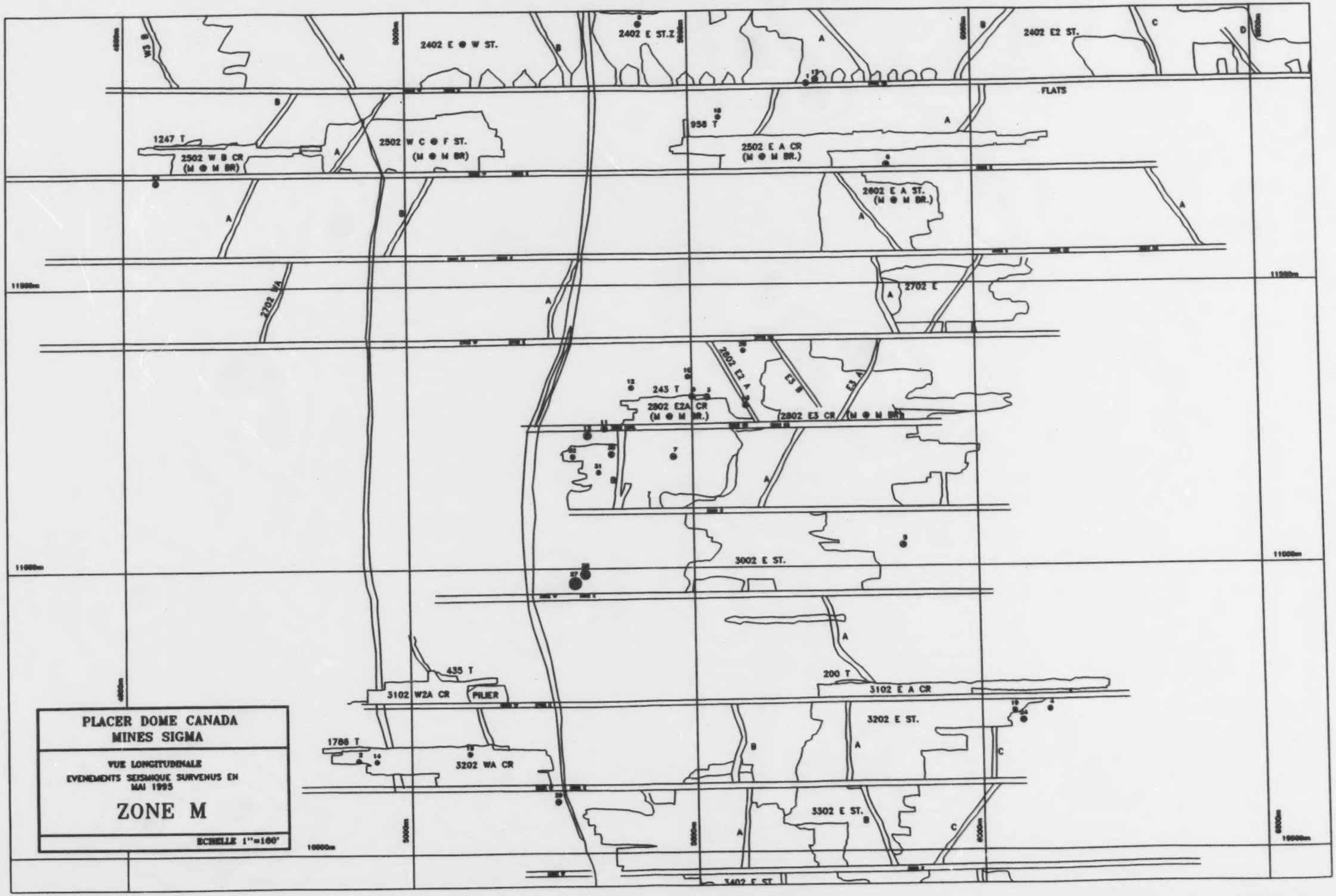
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA

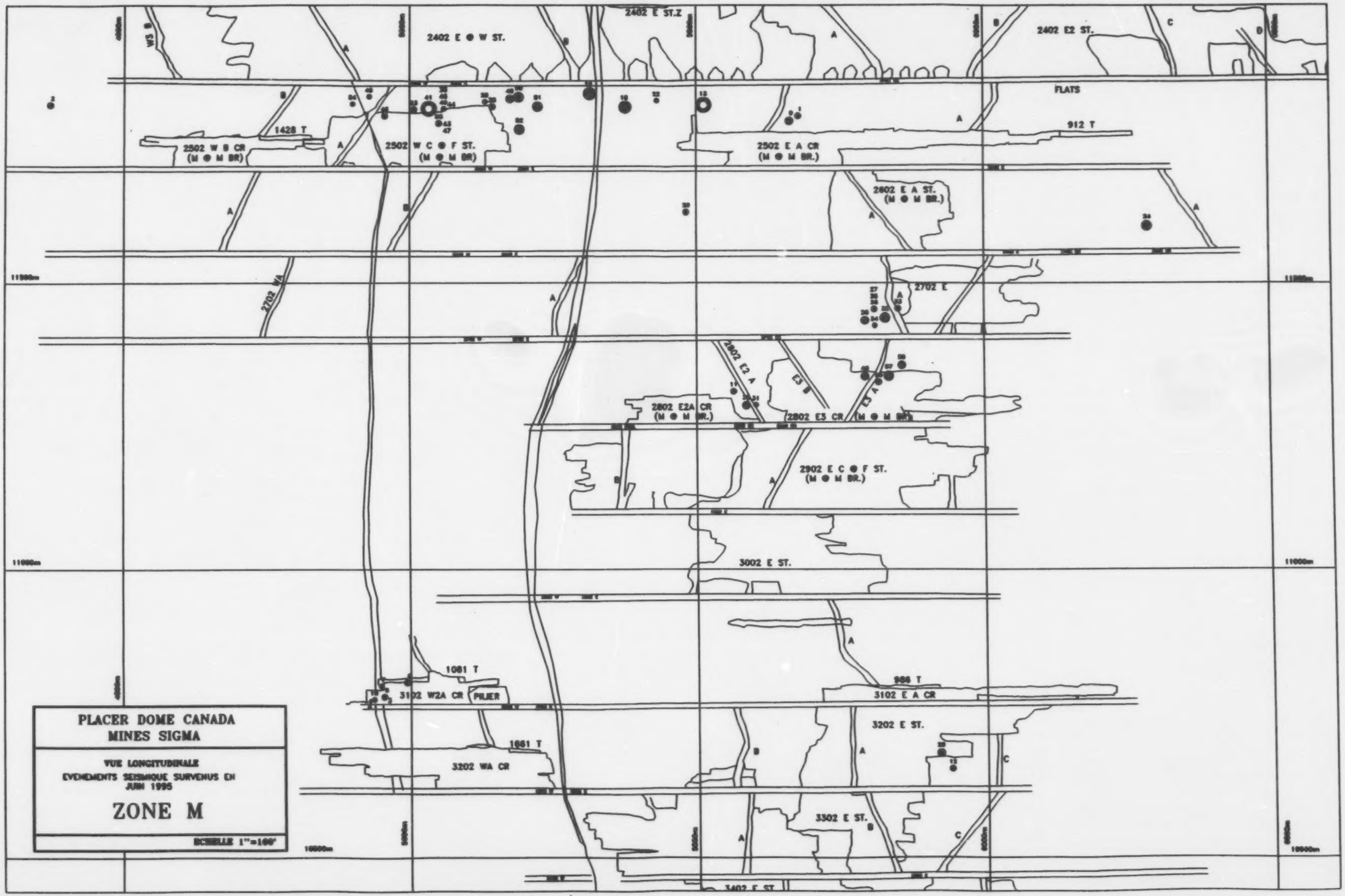
VUE LONGITUDENALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN MARS 1995

ZONE M

ECHELLE 1"=160'


2402 E ● W ST.
2402 E ST.Z
2402 E2 ST.
FLATS
2502 W B CR (M ● M BR)
273 T
2502 W C ● F ST. (M ● M BR)
2502 E A CR (M ● M BR.)
1368 T
2602 E A ST. (M ● M BR.)
2702 WA
2702 E
2802 E2 A
E3 B
E3 A
2802 E2A CR (M ● M BR.)
2802 E3 CR (M ● M BR.)
79 T
2902 E C ● F ST. (M ● M BR.)
3002 E ST.
3102 W2A CR
875 T
PILIER
3102 E A CR
1717 T
3202 E ST.
2253 T
3202 WA CR
3302 E ST.
3402 E ST.
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN AVRIL 1995
ZONE M
ECHELLE 1"=100'


2402 E ● W ST.
2402 E ST.Z
2402 E2 ST.
FLATS
1247 T
2502 W B CR
(M ● M BR)
2502 W C ● F ST.
(M ● M BR)
958 T
2502 E A CR
(M ● M BR.)
2602 E A ST.
(M ● M BR.)
2702 WA
2702 E
2802 E2 A
E3 B
E3 A
245 T
2802 E2A CR
(M ● M BR.)
2802 E3 CR (M ● M BR.)
3002 E ST.
435 T
3102 W2A CR
PILIER
200 T
3102 E A CR
3202 E ST.
1788 T
3202 WA CR
3302 E ST.
3402 E ST.
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
MAI 1995
ZONE M
ECHELLE 1"=160'

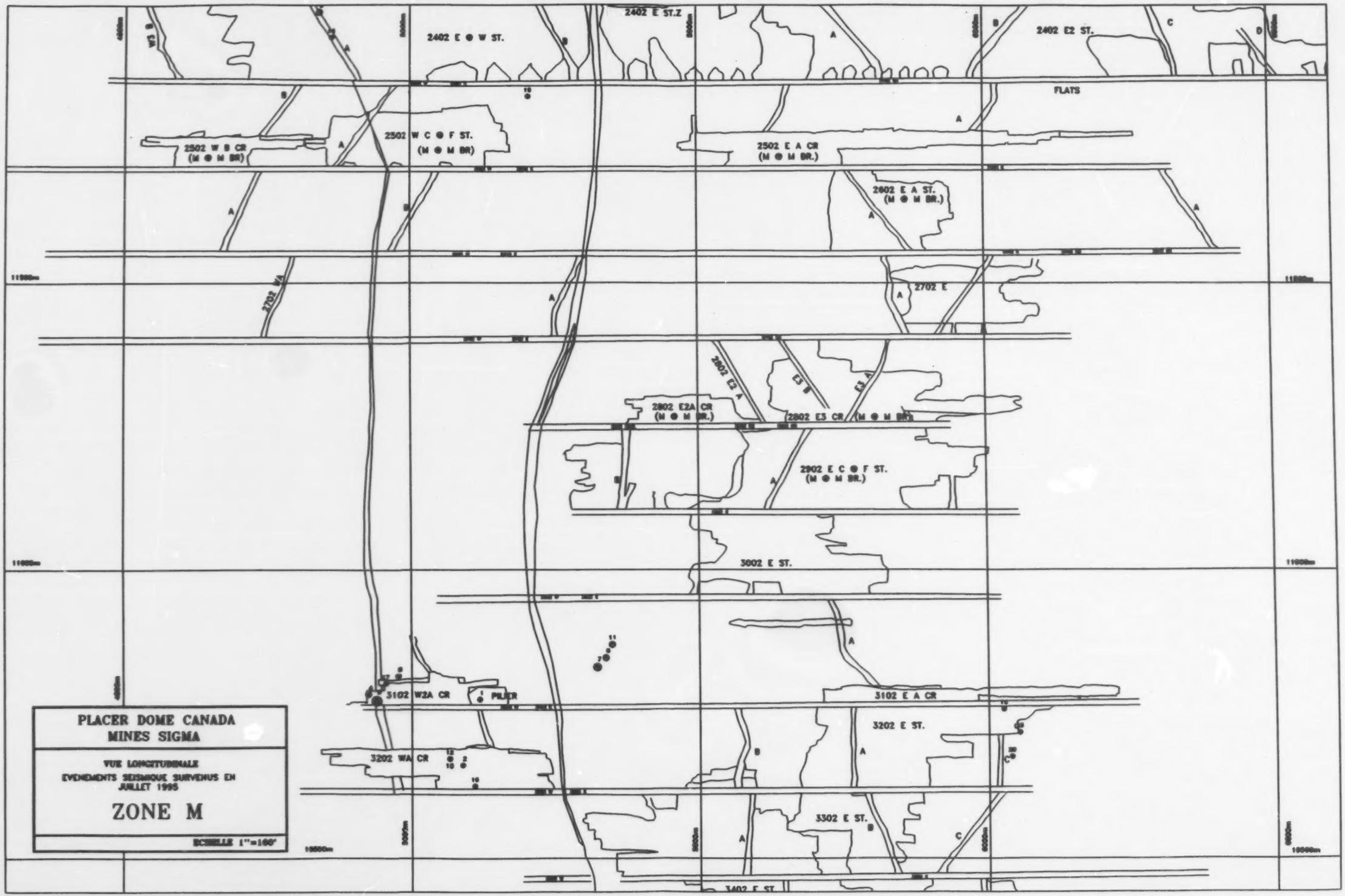


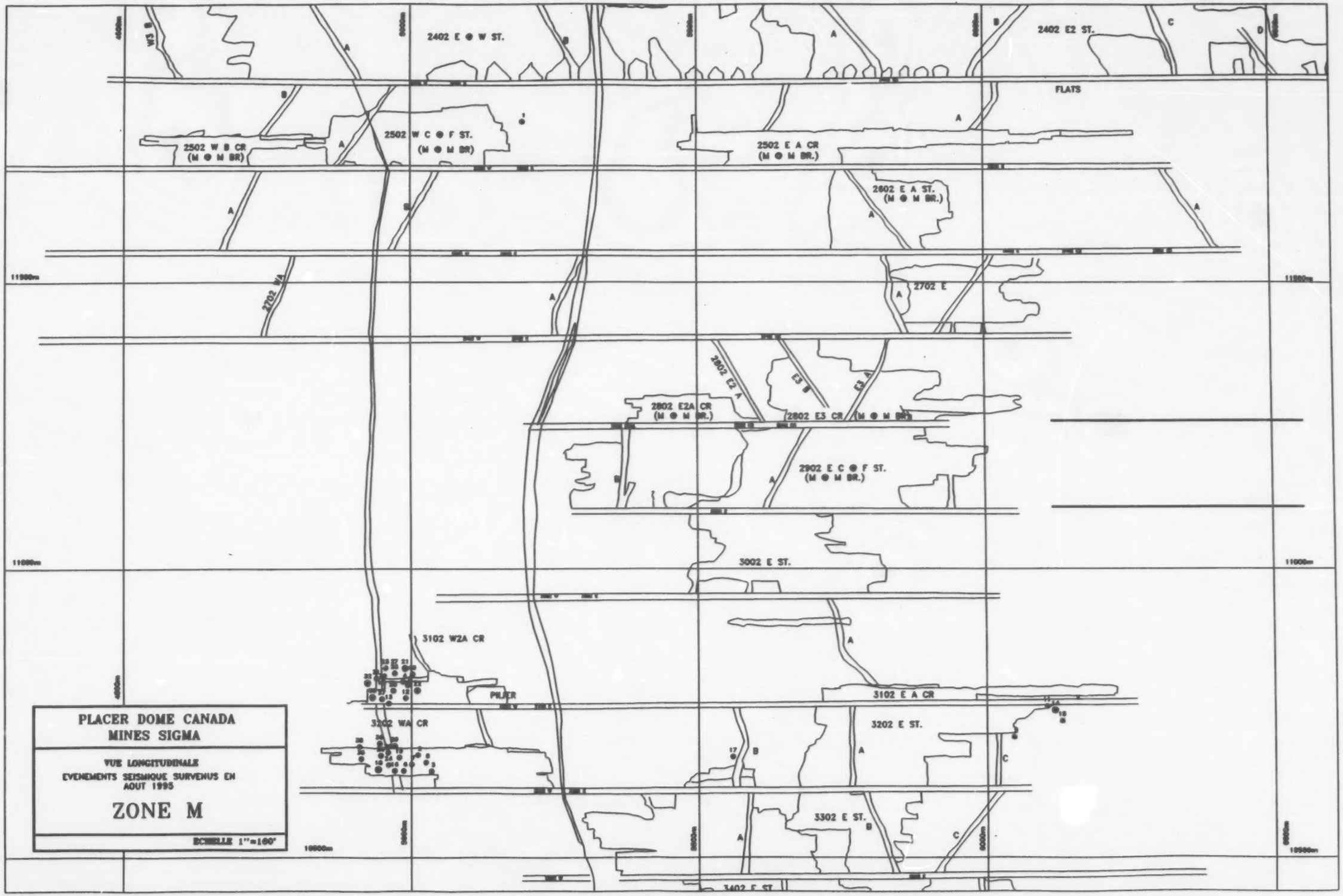
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA

VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN
JUIN 1995

ZONE M

ECHELLE 1"=100'

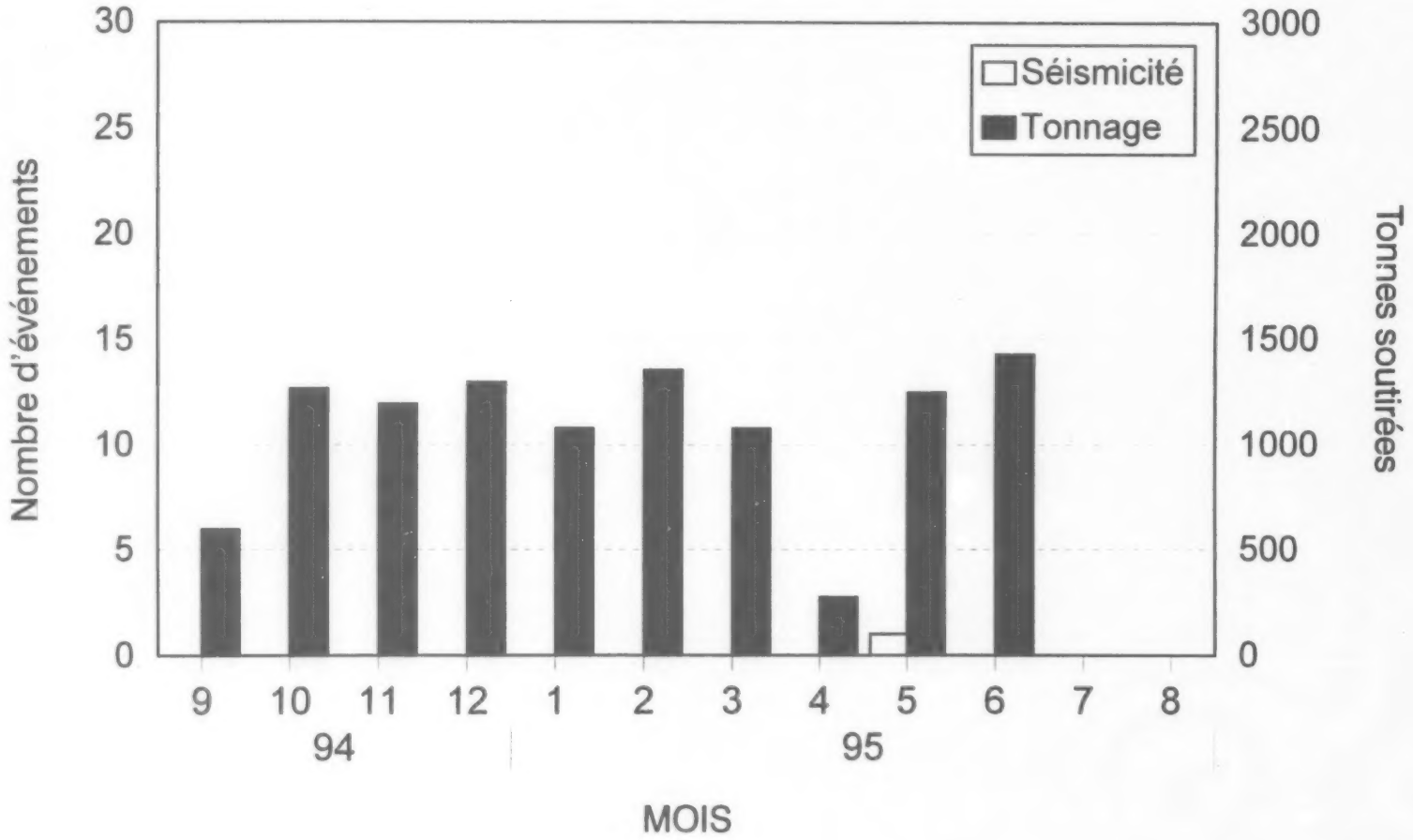

2402 E ● W ST.
2402 E ST.Z
2402 E2 ST.
FLATS
2502 W B CR (M ● M BR)
2502 W C ● F ST. (M ● M BR)
2502 E A CR (M ● M BR.)
2602 E A ST. (M ● M BR.)
2702 W A
2702 E
2802 E2 A
2802 E2A CR (M ● M BR.)
2802 E3 CR (M ● M BR.)
2902 E C ● F ST. (M ● M BR.)
3002 E ST.
3102 W2A CR
PILER
3102 E A CR
3202 E ST.
3202 W A CR
3302 E ST.
3402 E ST.
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN JUILLET 1995
ZONE M
ECHELLE 1"=100'


2402 E ● W ST.
2402 E2 ST.
FLATS
2502 W B CR (M ● M BR)
2502 W C ● F ST. (M ● M BR)
2502 E A CR (M ● M BR.)
2602 E A ST. (M ● M BR.)
2702 W A
2702 E
2802 E2A CR (M ● M BR.)
2802 E3 CR (M ● M BR.)
2902 E C ● F ST. (M ● M BR.)
3002 E ST.
3102 W2A CR
3102 E A CR
3202 W A CR
3202 E ST.
3302 E ST.
3402 E ST.
PILIER
11500m
11000m
10500m
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
EVENEMENTS SEISMIQUE SURVENUS EN AOUT 1995
ZONE M
ECHELLE 1"=100'

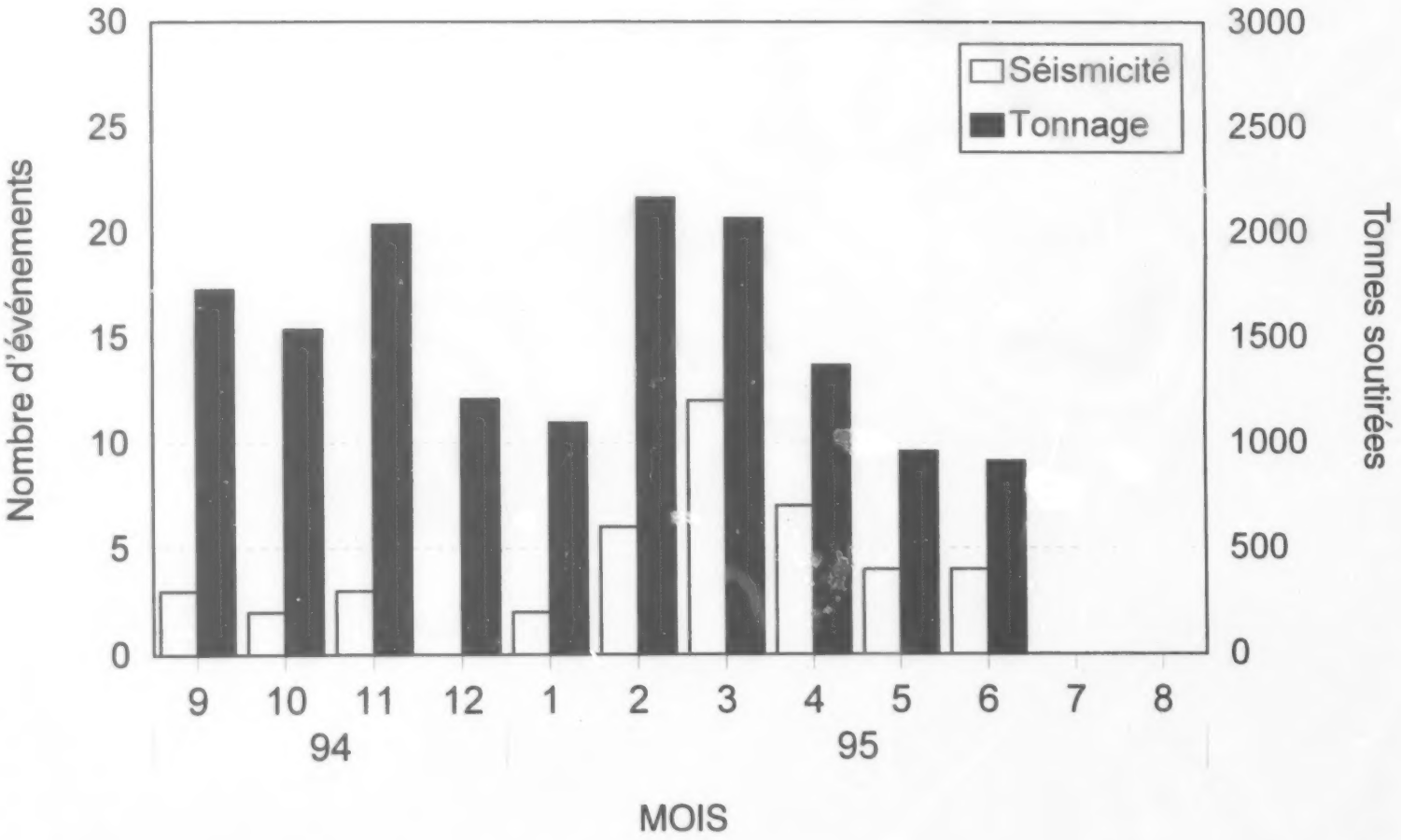
APPENDICE C

Distribution de l'activité séismique et du taux d'extraction pour les chantiers actifs de la zone M

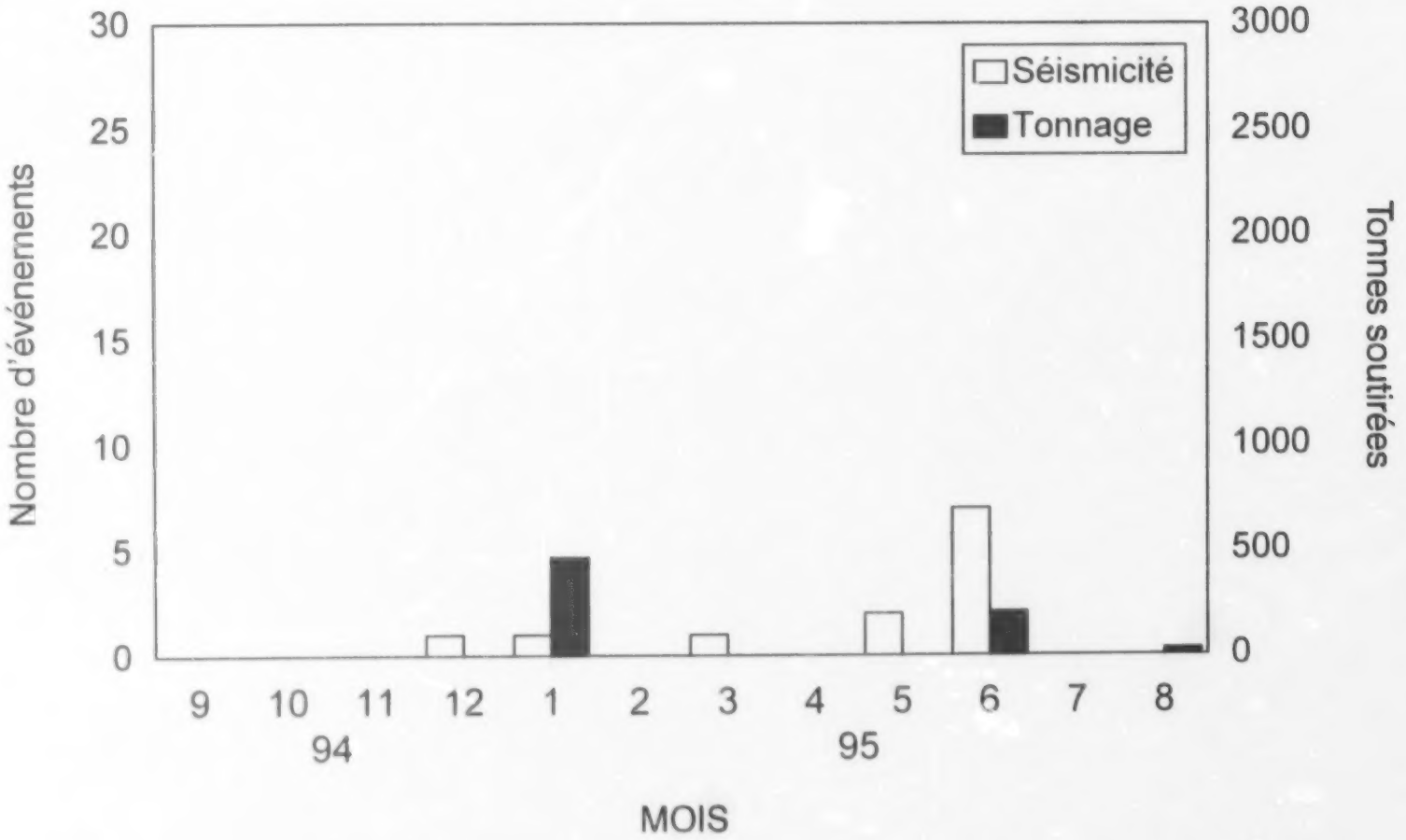
CHANTIER 2502 WB



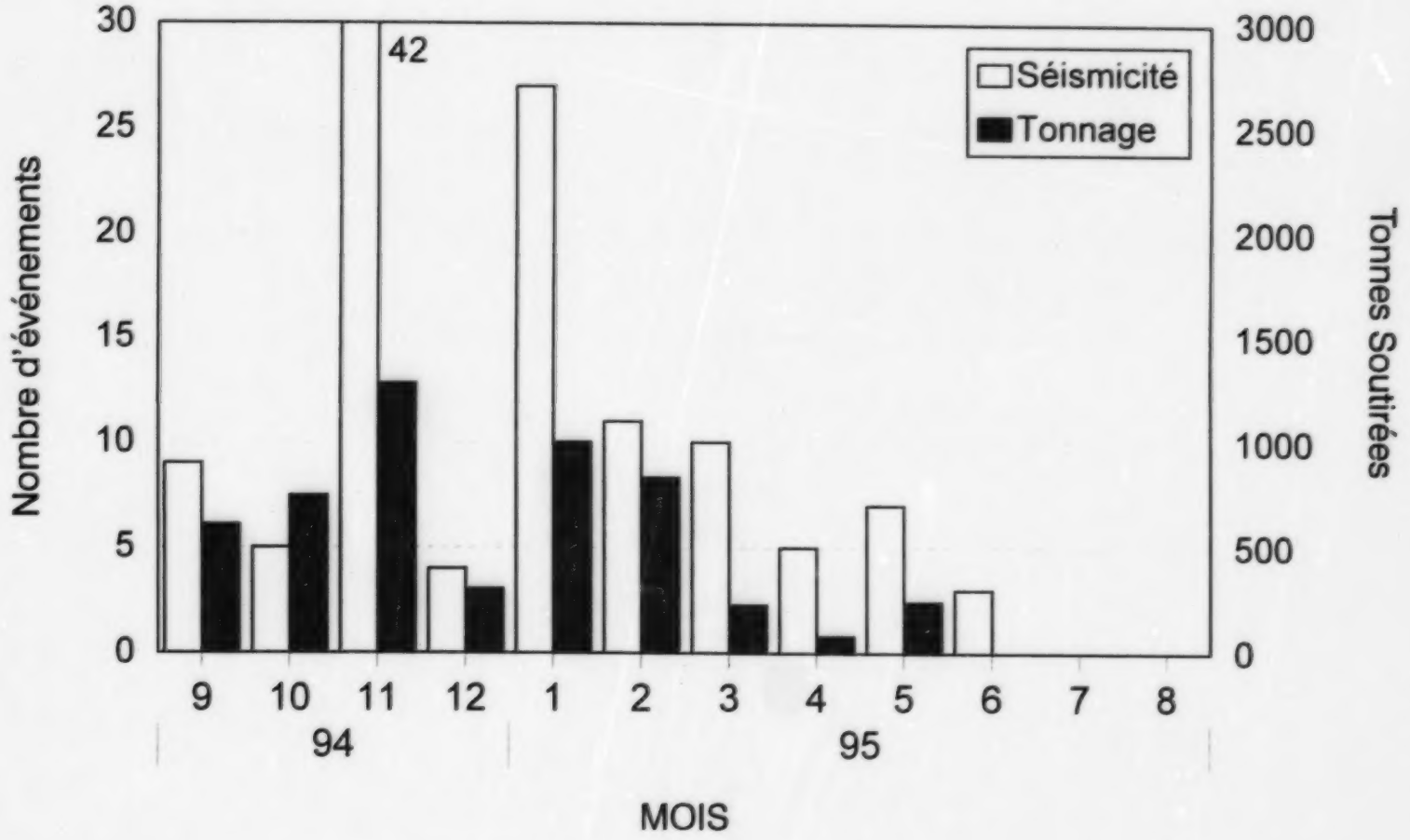
CHANTIER 2502 EA



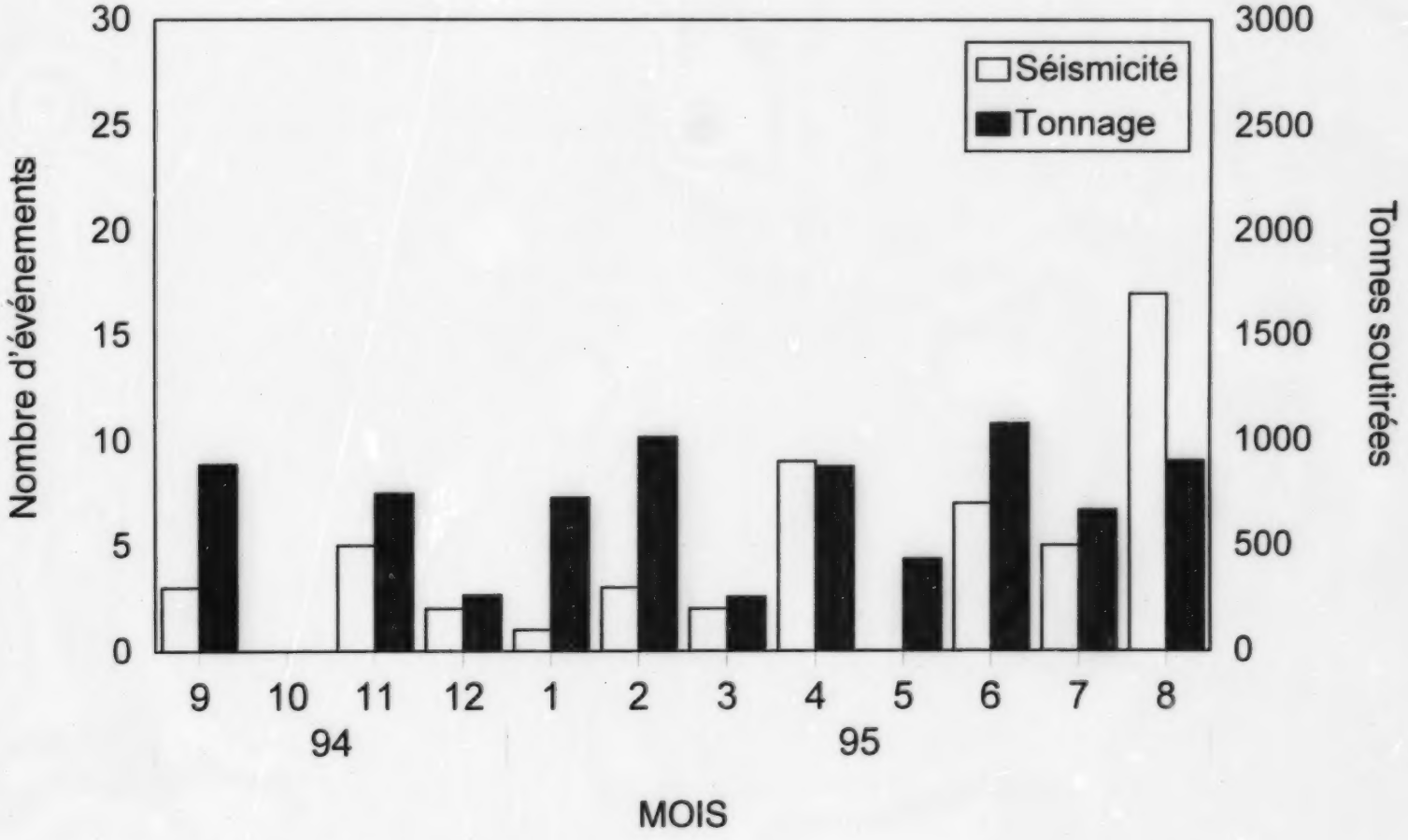
CHANTIER 2702 EA



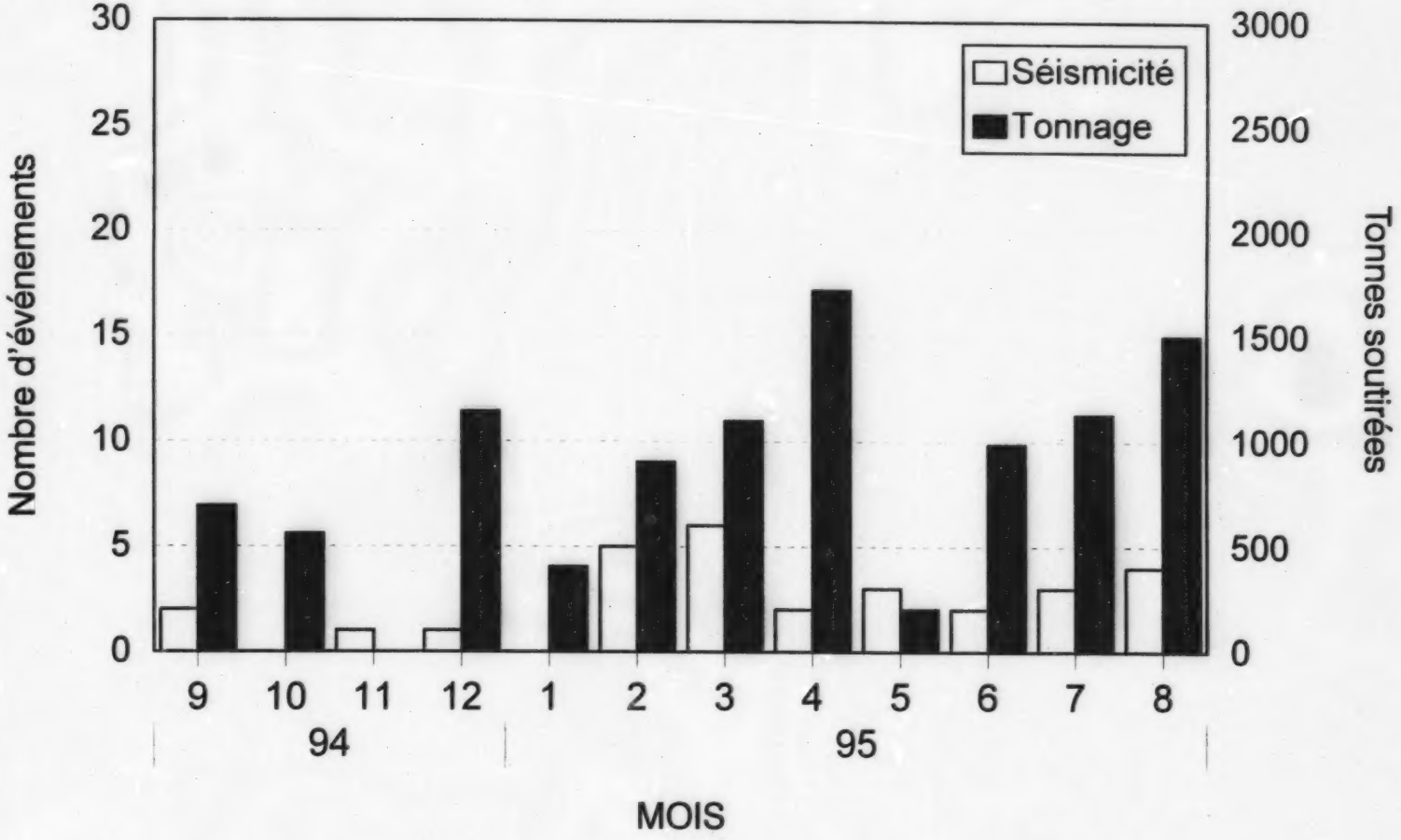
CHANTIER 2802 E2A



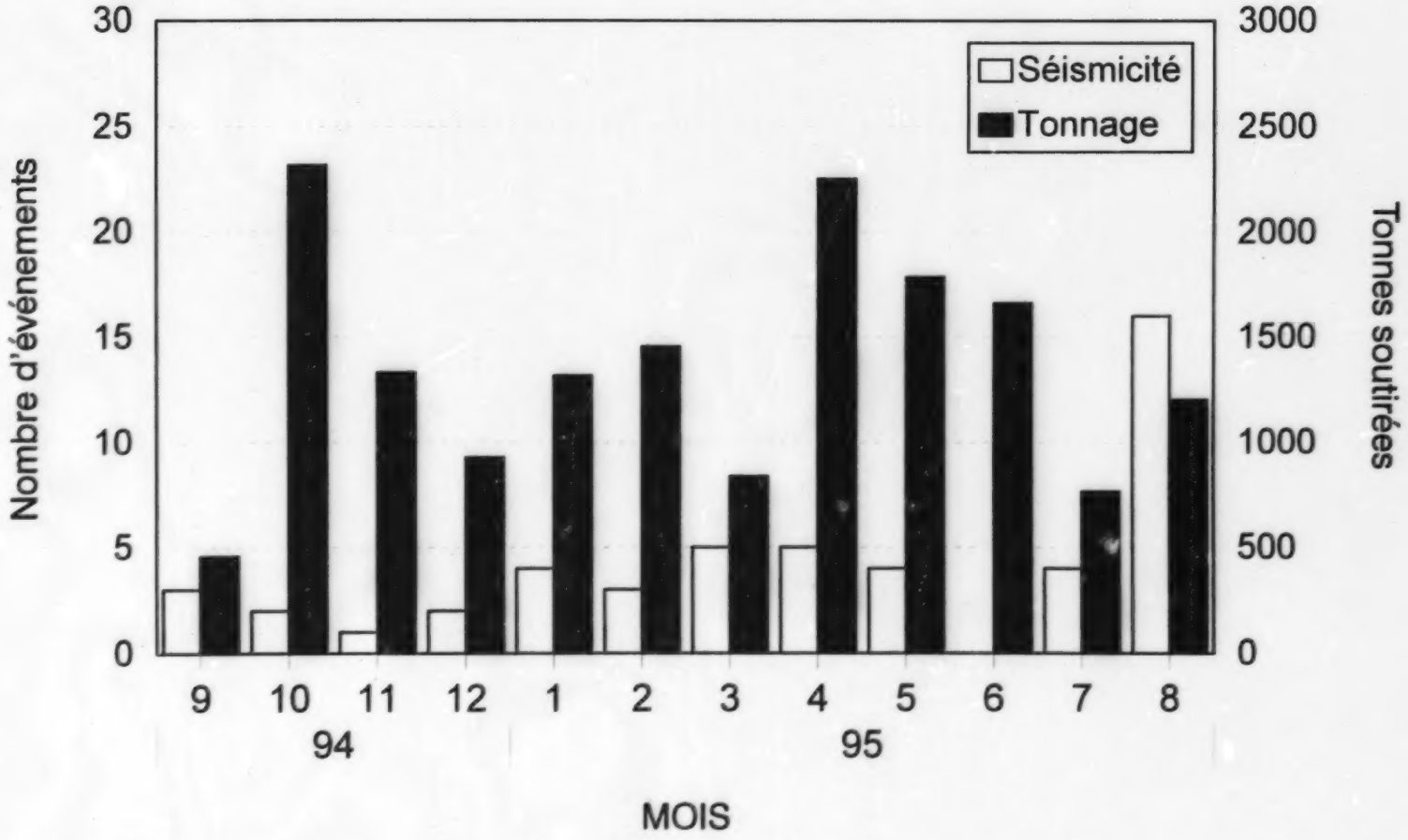
CHANTIER 3102 W2A



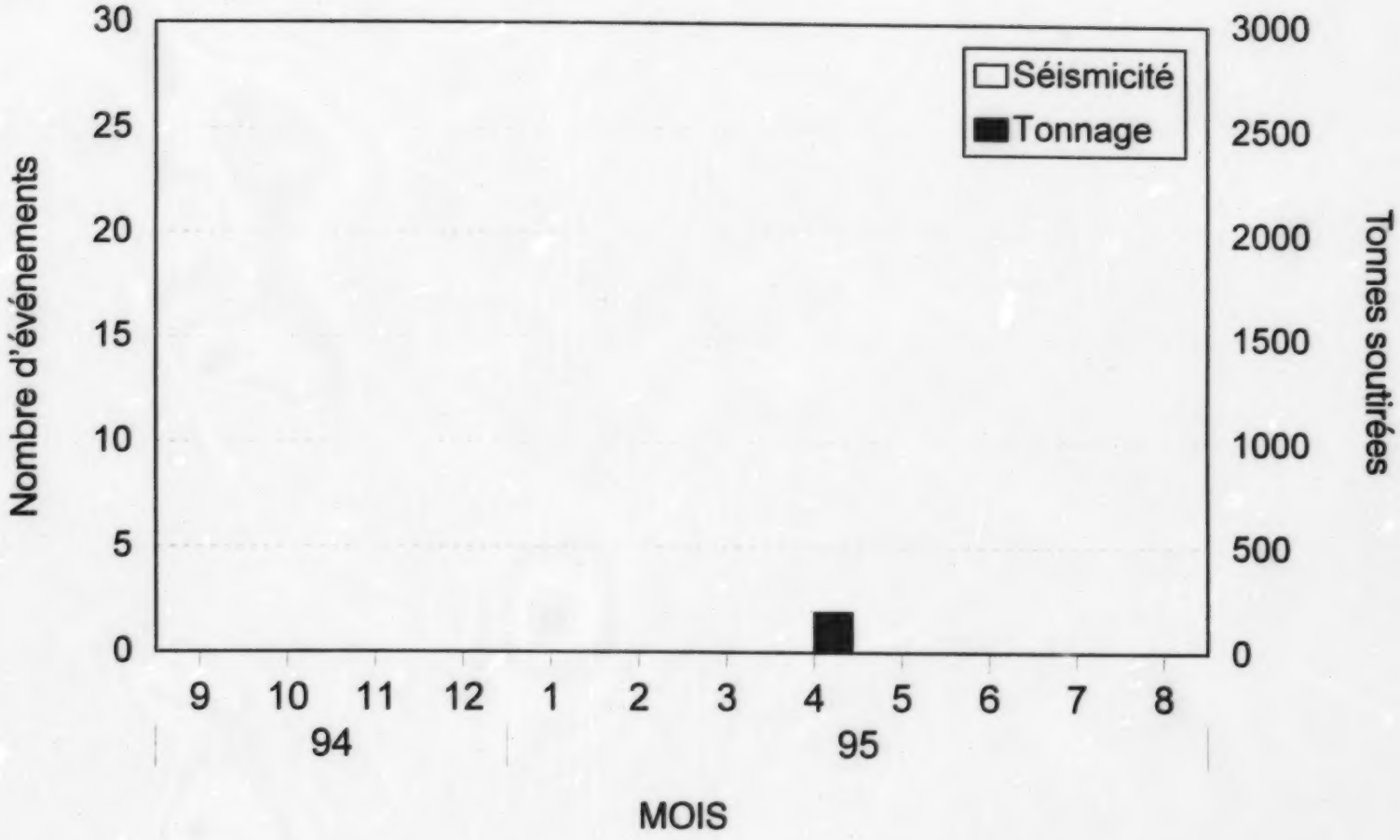
CHANTIER 3102 EA



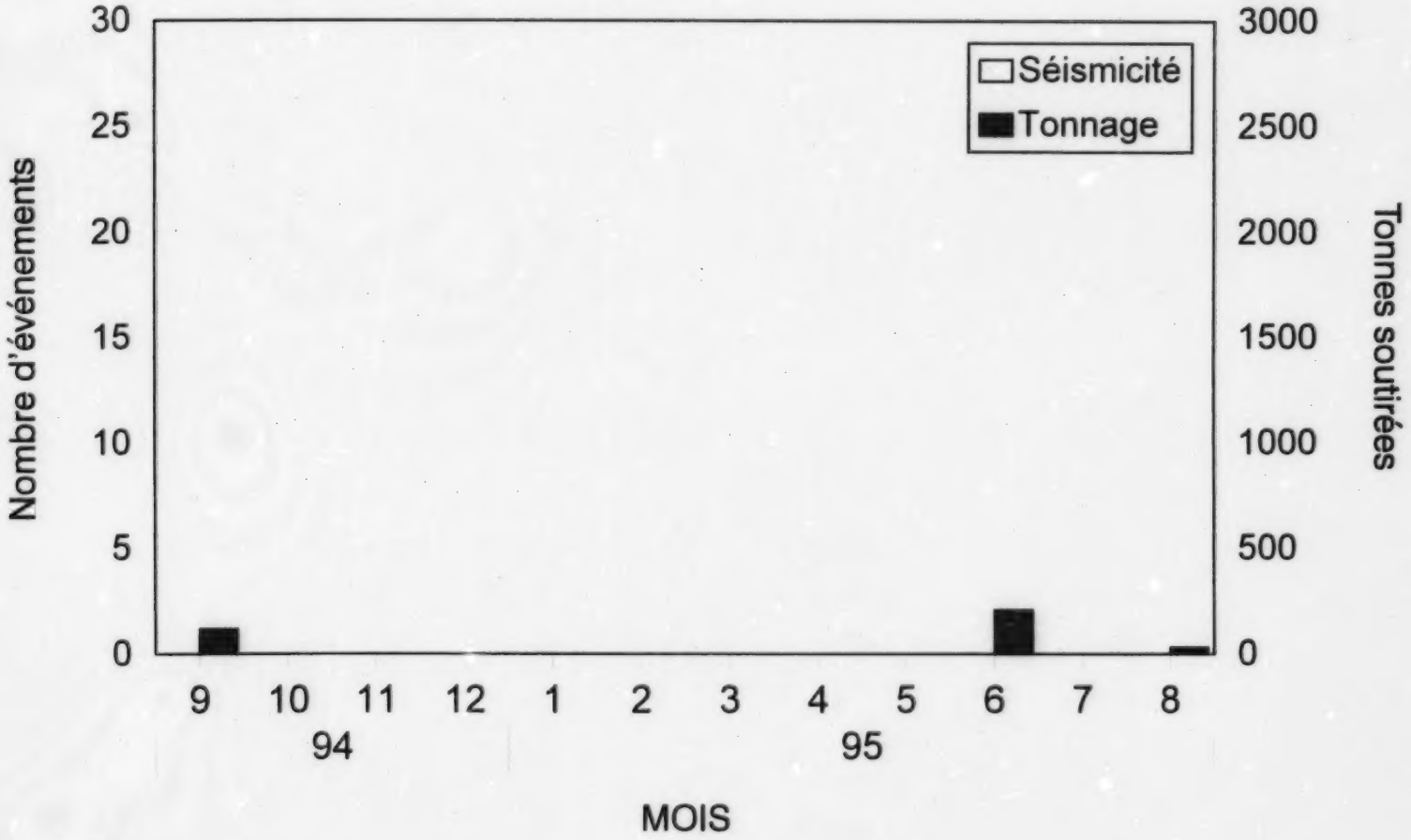
CHANTIER 3202 WA



CHANTIER 2602 E4

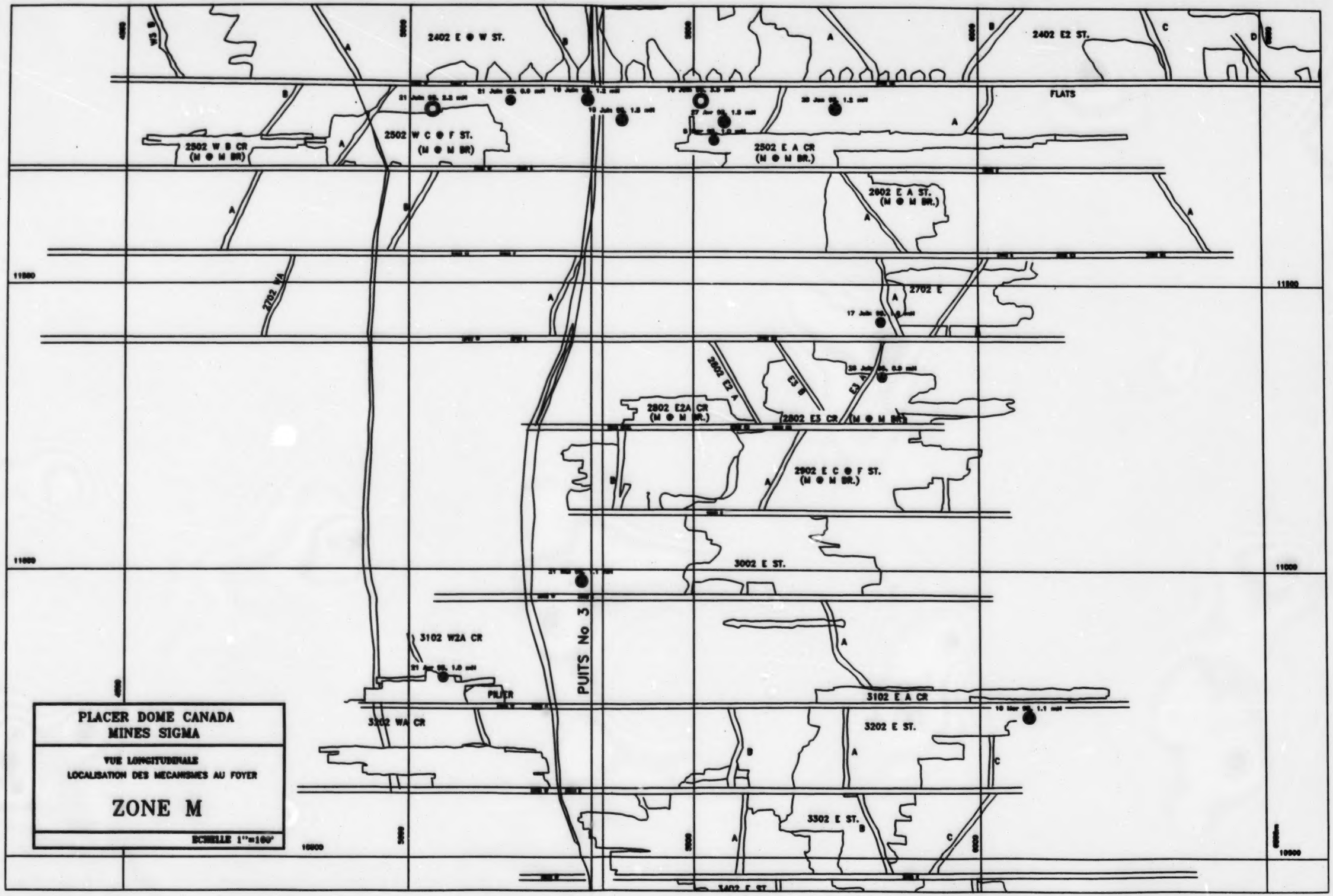


CHANTIER 2702 E2A



APPENDICE D

Projections stéréographiques des analyses de mécanismes au foyer et localisation des événements retenus


2402 E ● W ST.
2402 E2 ST.
FLATS
2502 W B CR (M ● M BR)
2502 W C ● F ST. (M ● M BR)
2502 E A CR (M ● M BR.)
2802 E A ST. (M ● M BR.)
2702 E
2702 WA
2802 E2A CR (M ● M BR.)
2802 E3 CR (M ● M BR.)
2902 E C ● F ST. (M ● M BR.)
3002 E ST.
3102 W2A CR
3102 E A CR
3202 WA CR
3202 E ST.
3302 E ST.
3402 E ST.
PUITS No 3
PILIER
11800
11600
11400
10800
10600
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA
VUE LONGITUDINALE
LOCALISATION DES MECANISMES AU FOYER
ZONE M
ECHELLE 1"=100'

5300E

PUITS 3

5500E

5700E

2702 E2

2802 E2A CR (M @ M BR)

2802 E2 A

E3 B

E3 A

11300N

11300N

1 Fev 95, 0.9 mN

10 Jan 95, 0.9 mN

1 Fev 95, 0.9 mN

23 Dec 95, 1.0 mN

17 Fev 95, 1.4 mN

9 Mar 95, 1.4 mN

13 Jan 95, 0.9 mN

23 Fev 95, 1.2 mN

18 Jan 95, 1.2 mN

2802 E3 CR (M @ M BR)

2802 EGAL

2802 E2

2802 E3

11200N

2902 E C @ F ST. 11200N

(M @ M BR.)

B

A

11100N

2902 E

11100N

5300E

5500E

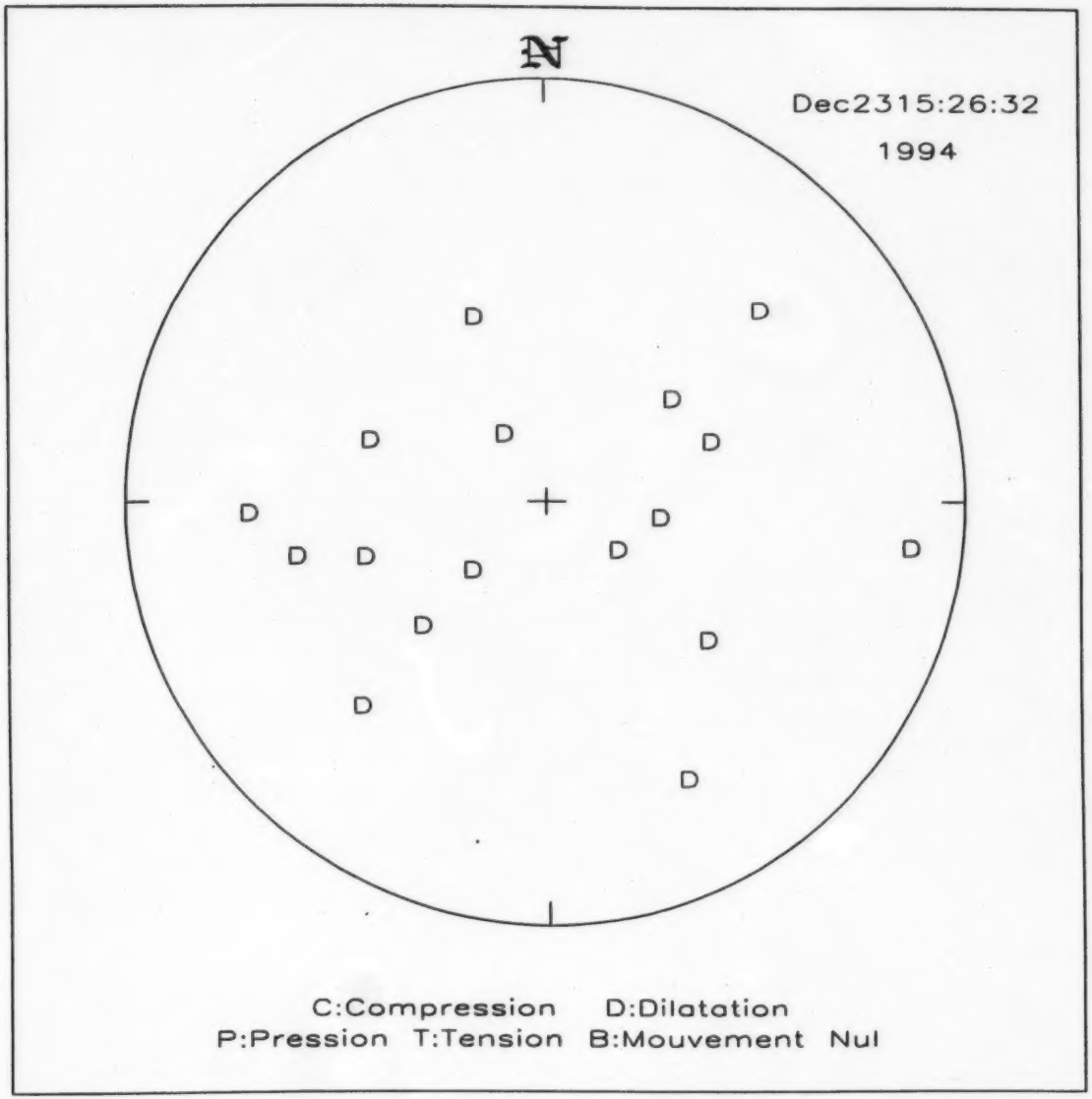
5700E

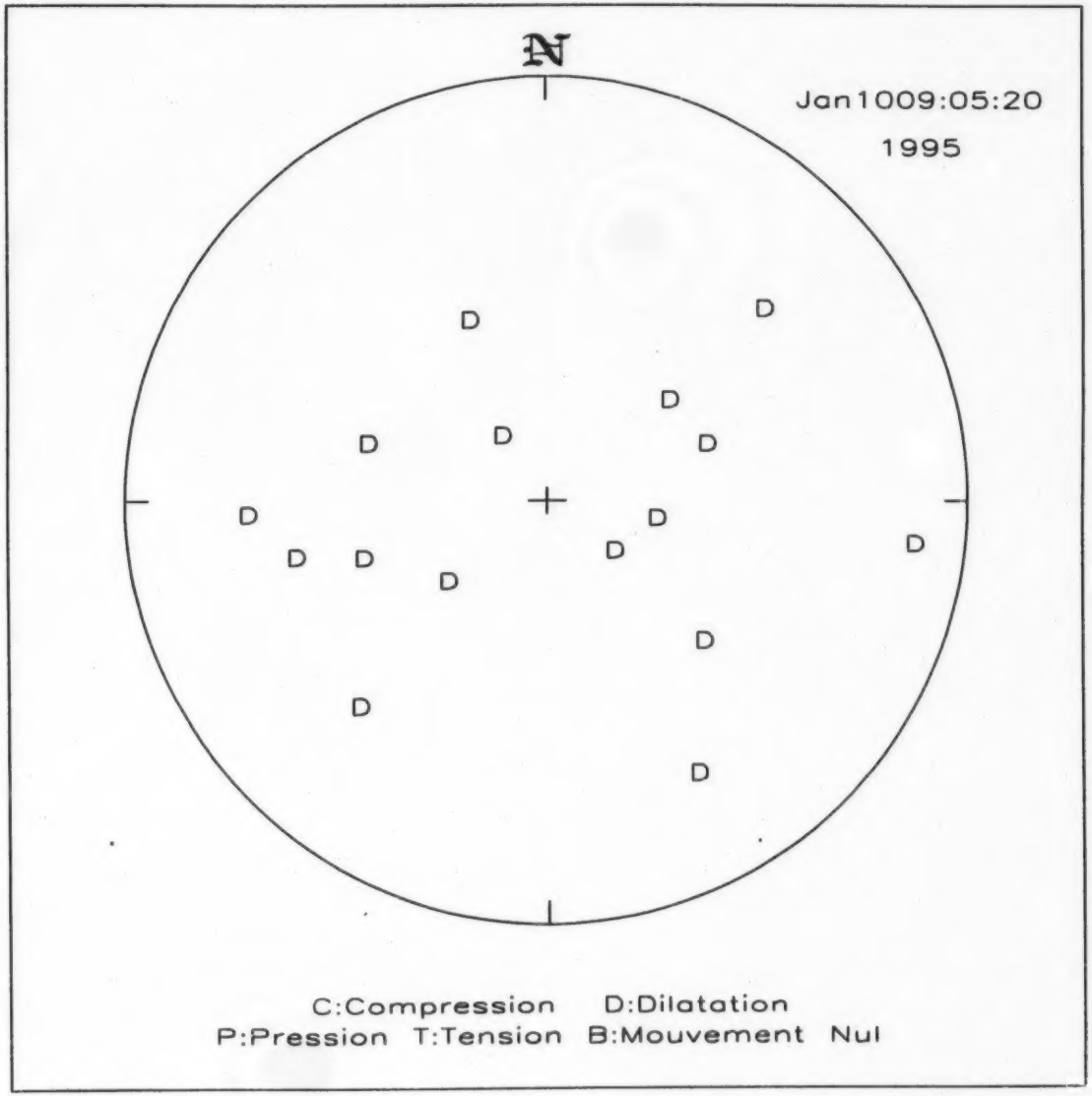
PLACER DOME CANADA
MINES SIGMA

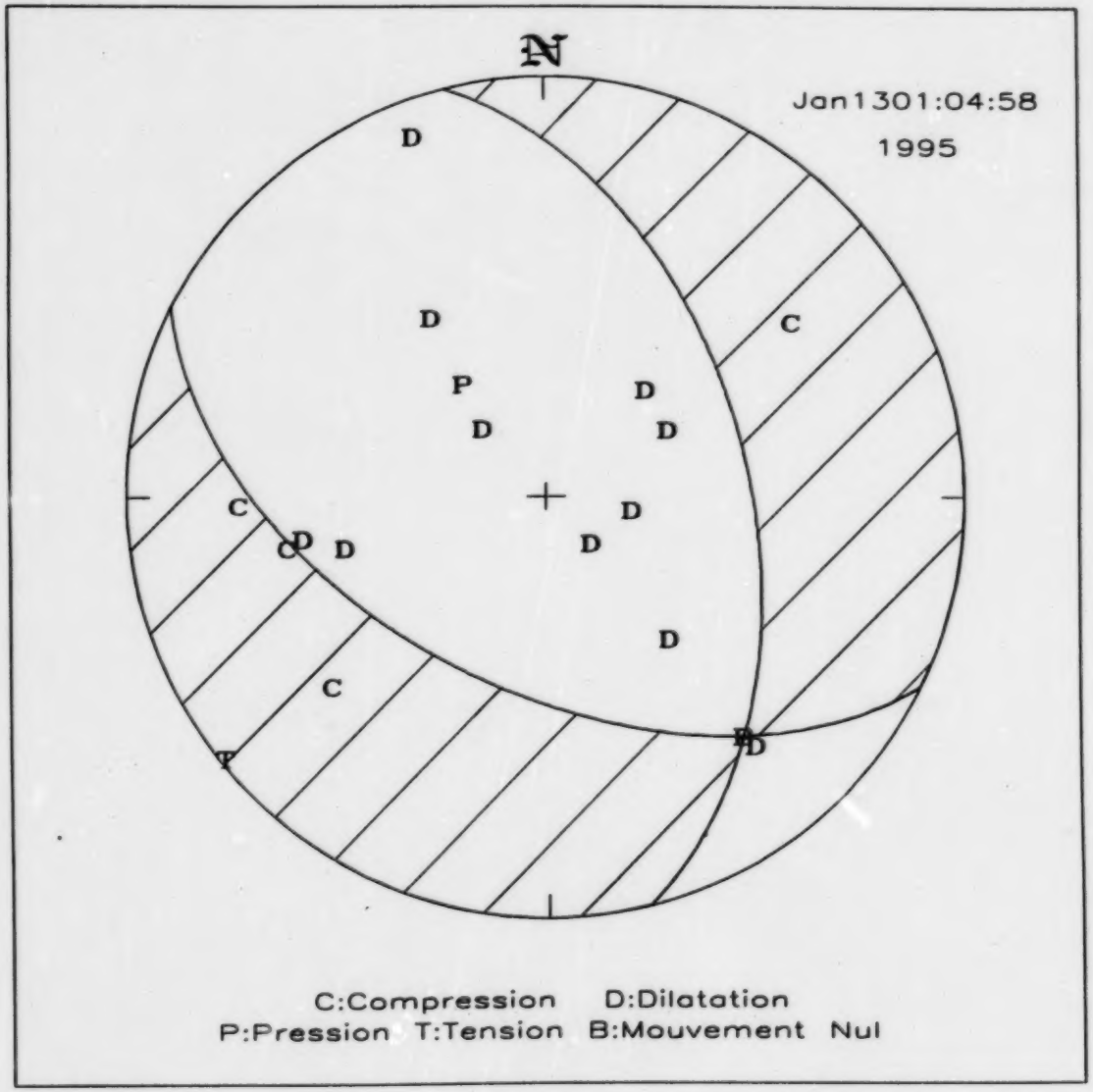
VUE LONGITUDINALE
LOCALISATION DES MECANISMES AU FOYER
CHANTIER 2802 E2A

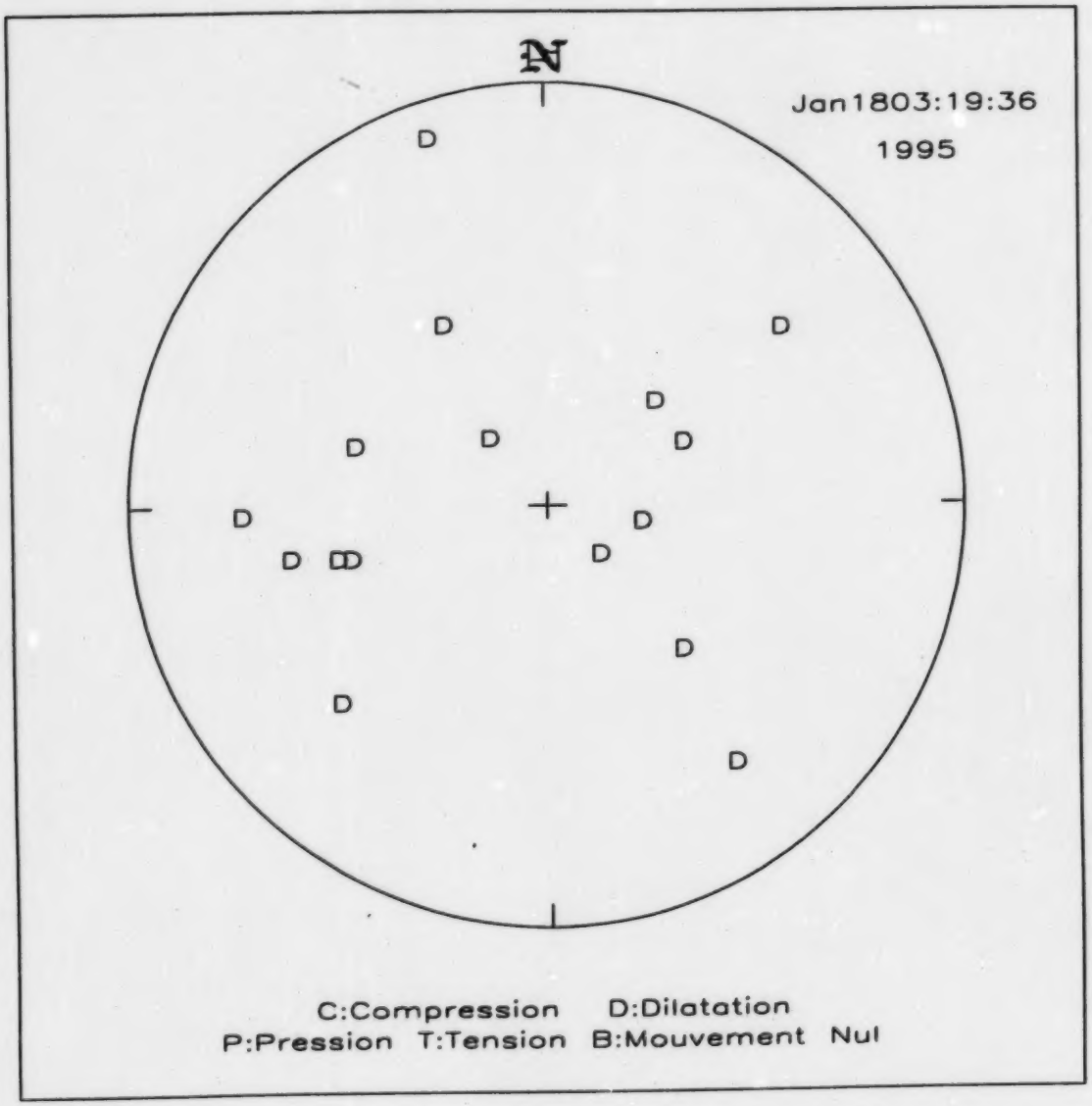
ZONE M

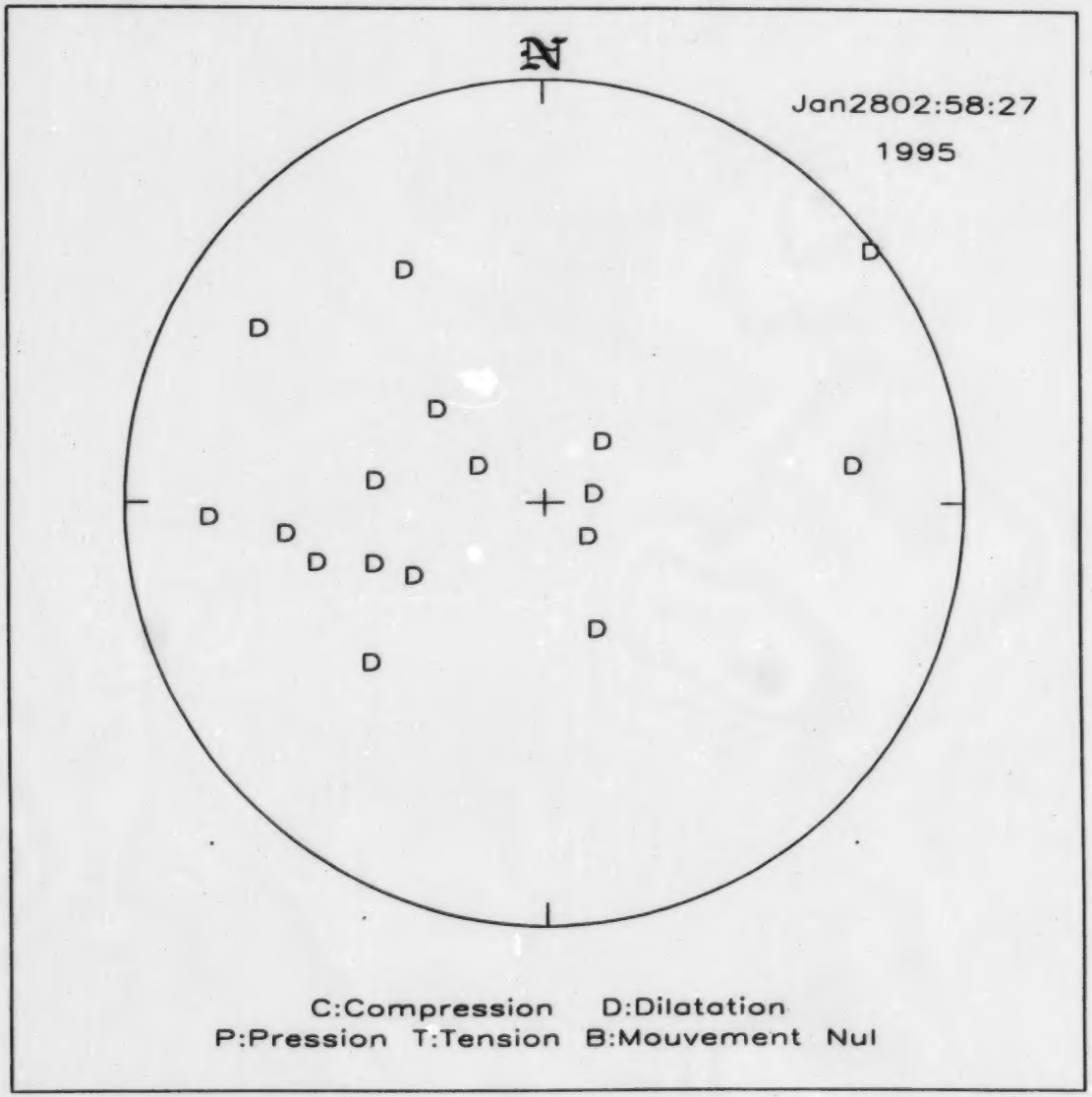
ECHELLE 1"=45'

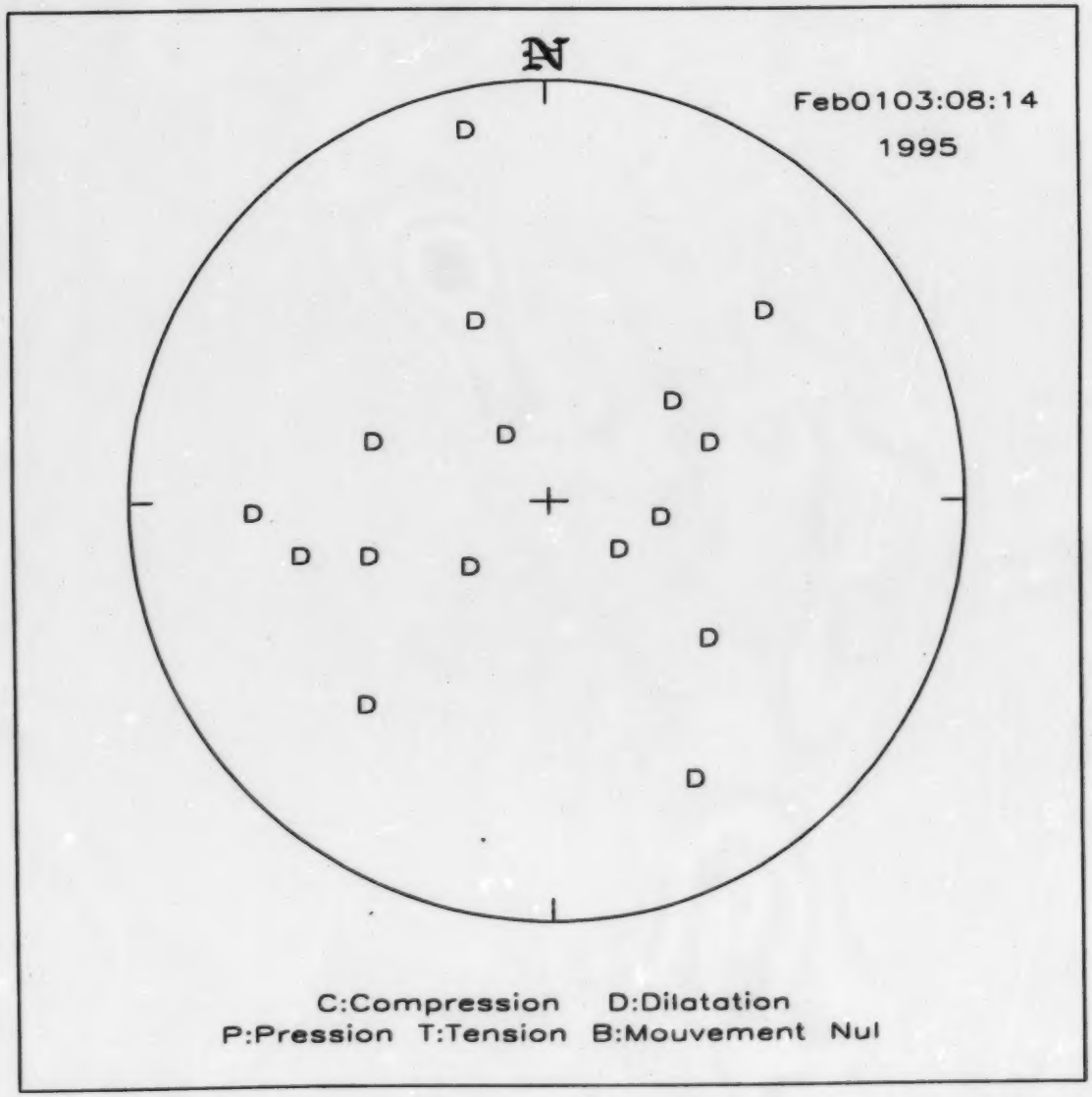

N
Dec2315:26:32
1994
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

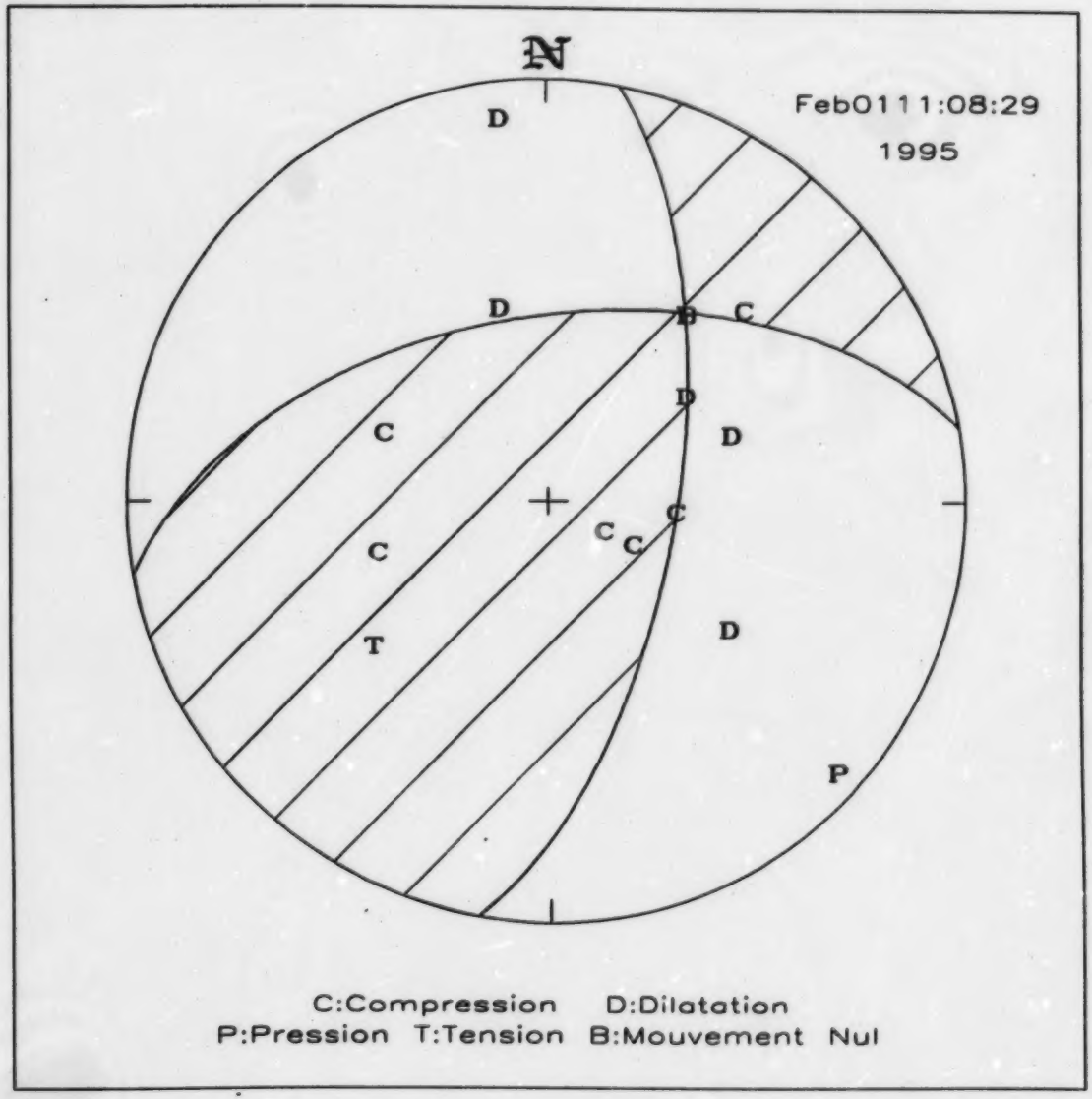

N
Jan1009:05:20
1995
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

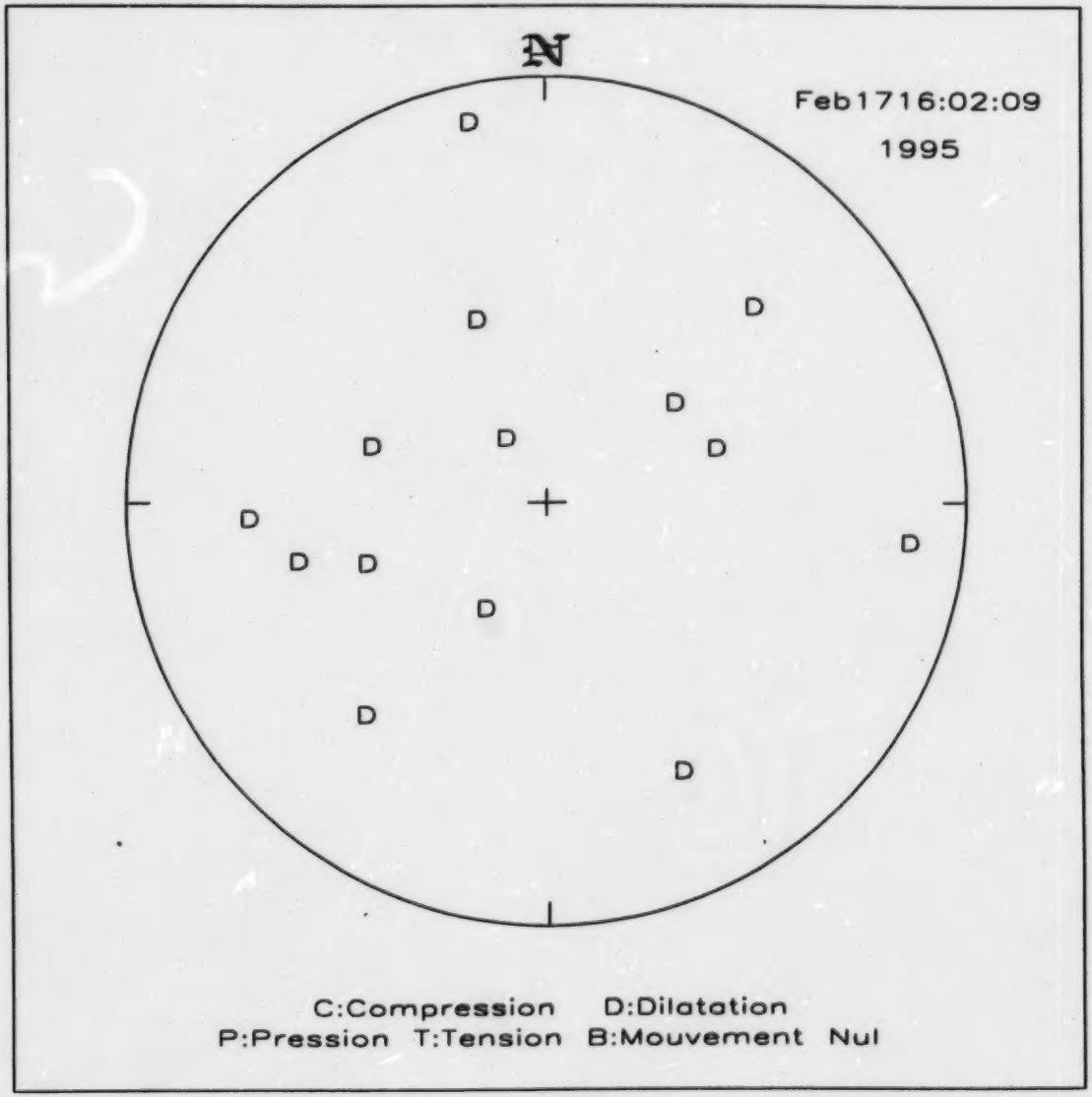

N
Jan1301:04:58
1995
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

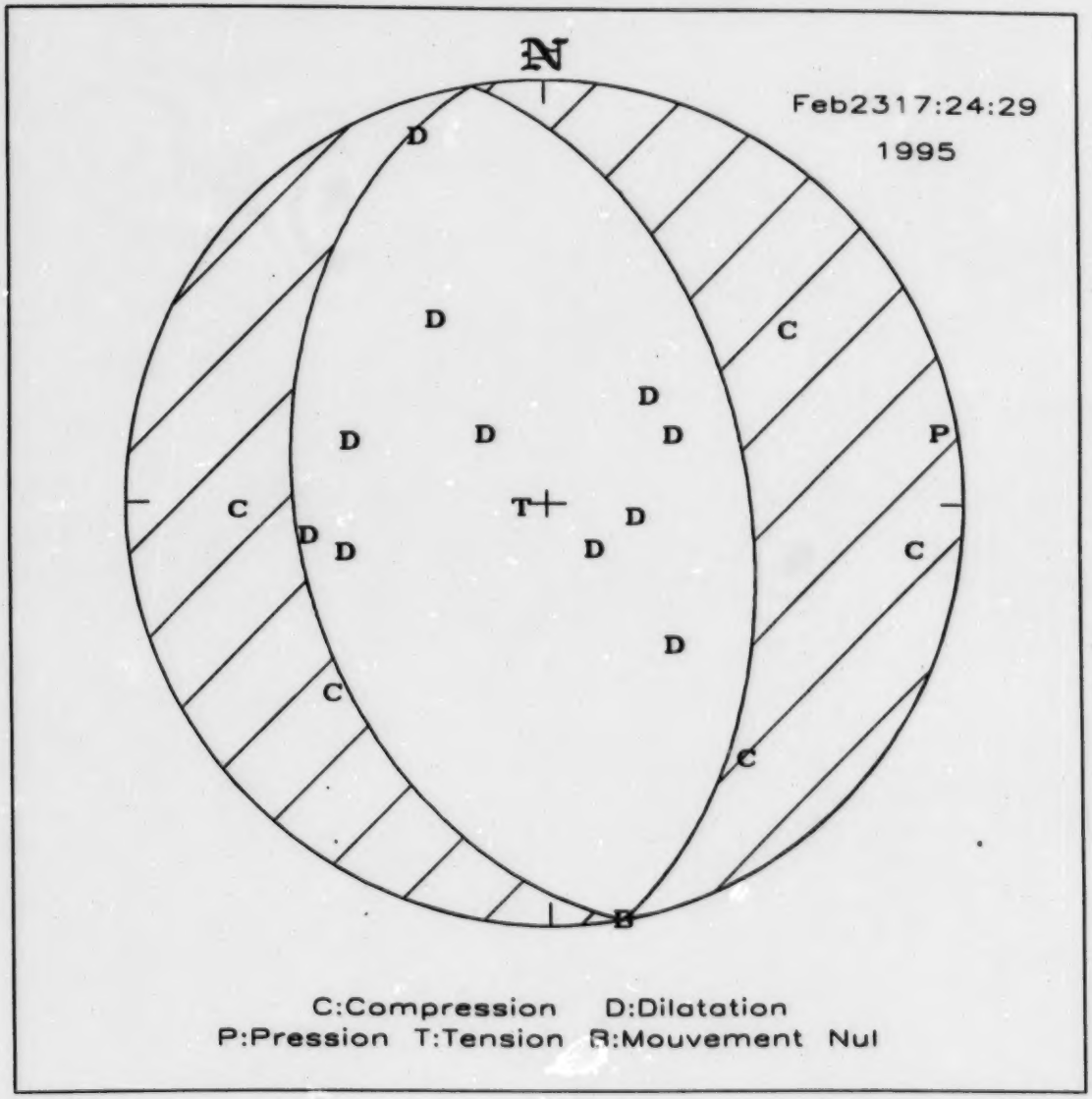

N
Jan1803:19:36
1995
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

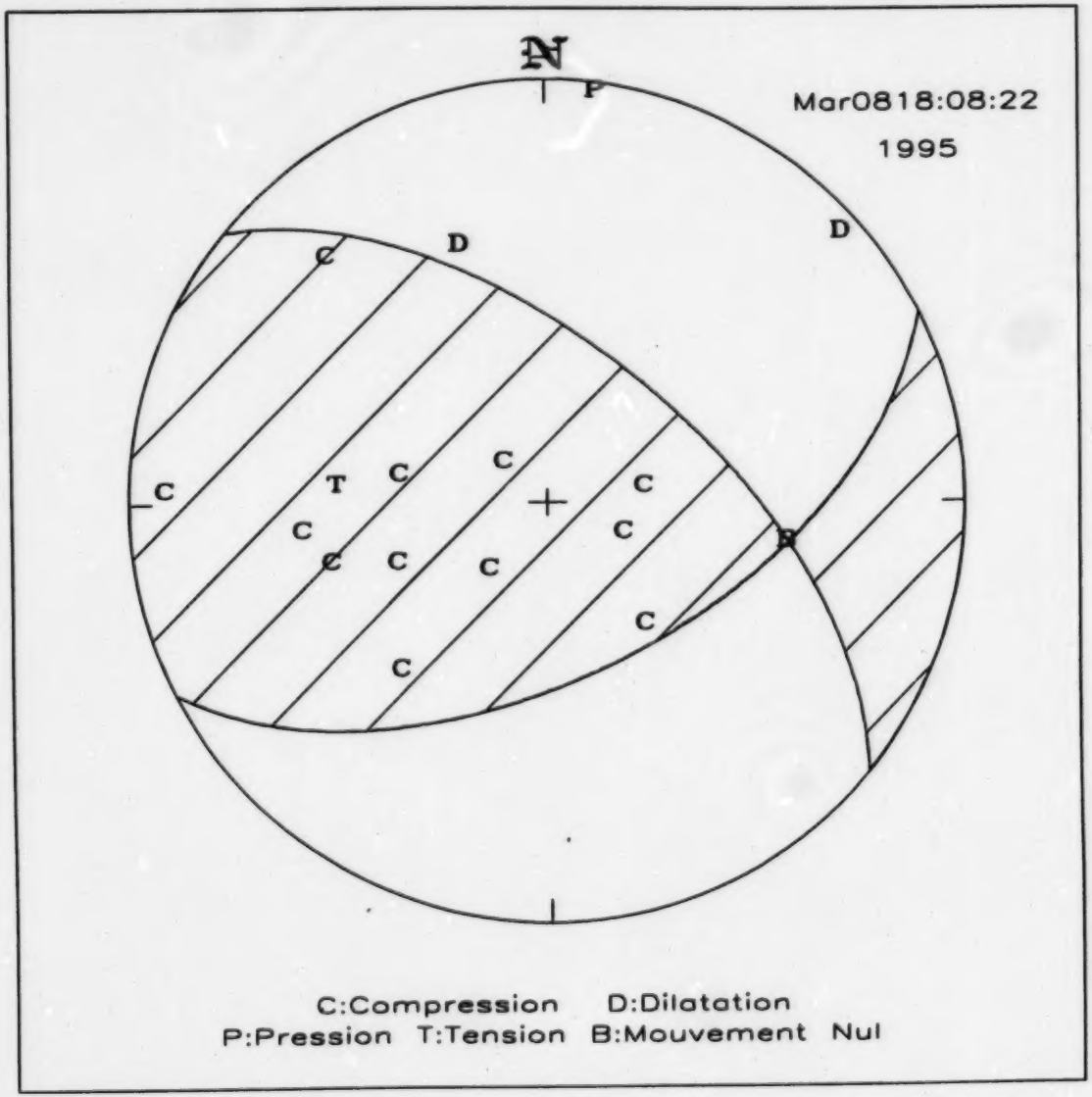

N
Jan2802:58:27
1995
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

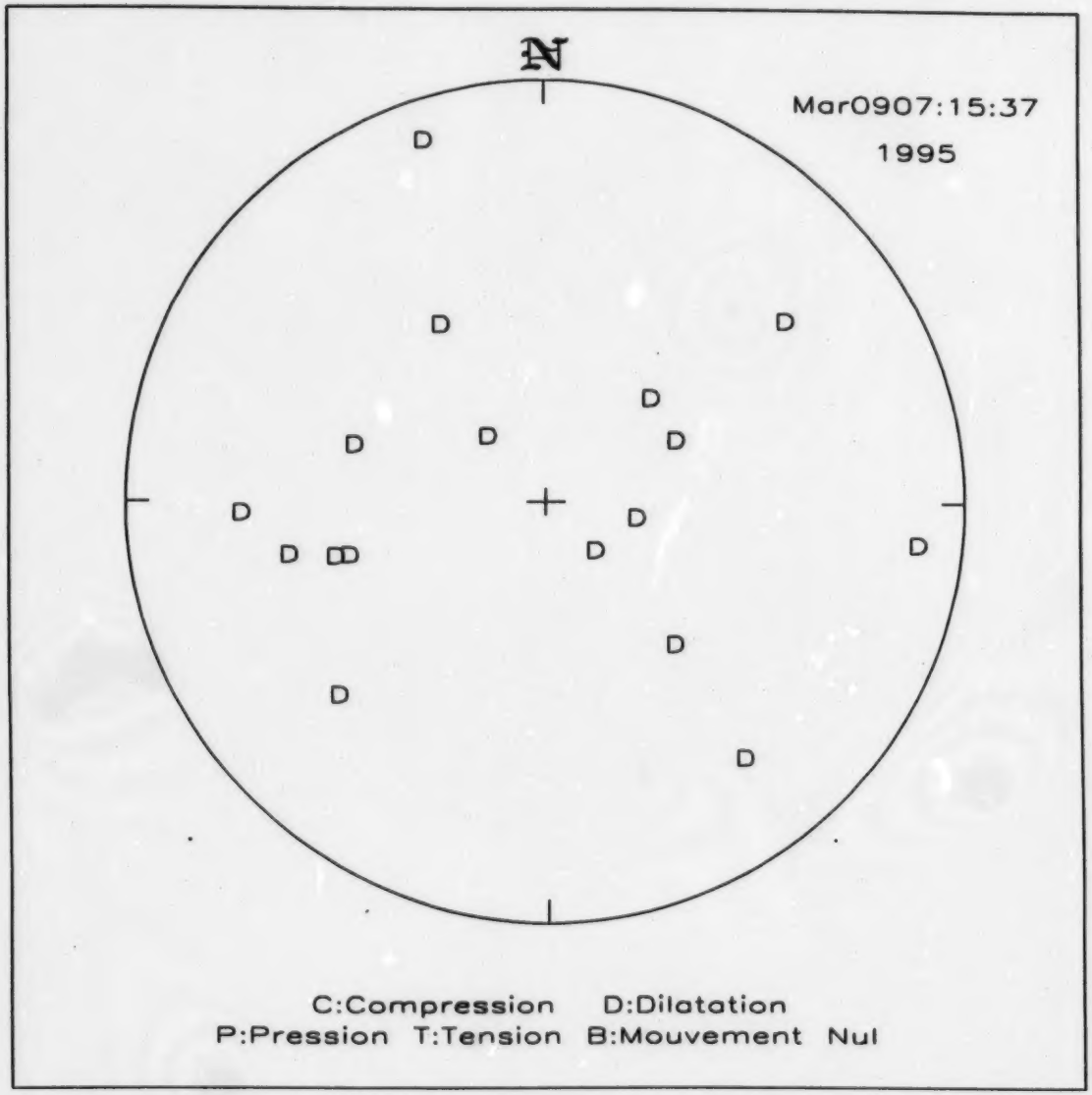

N
Feb0103:08:14
1995
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

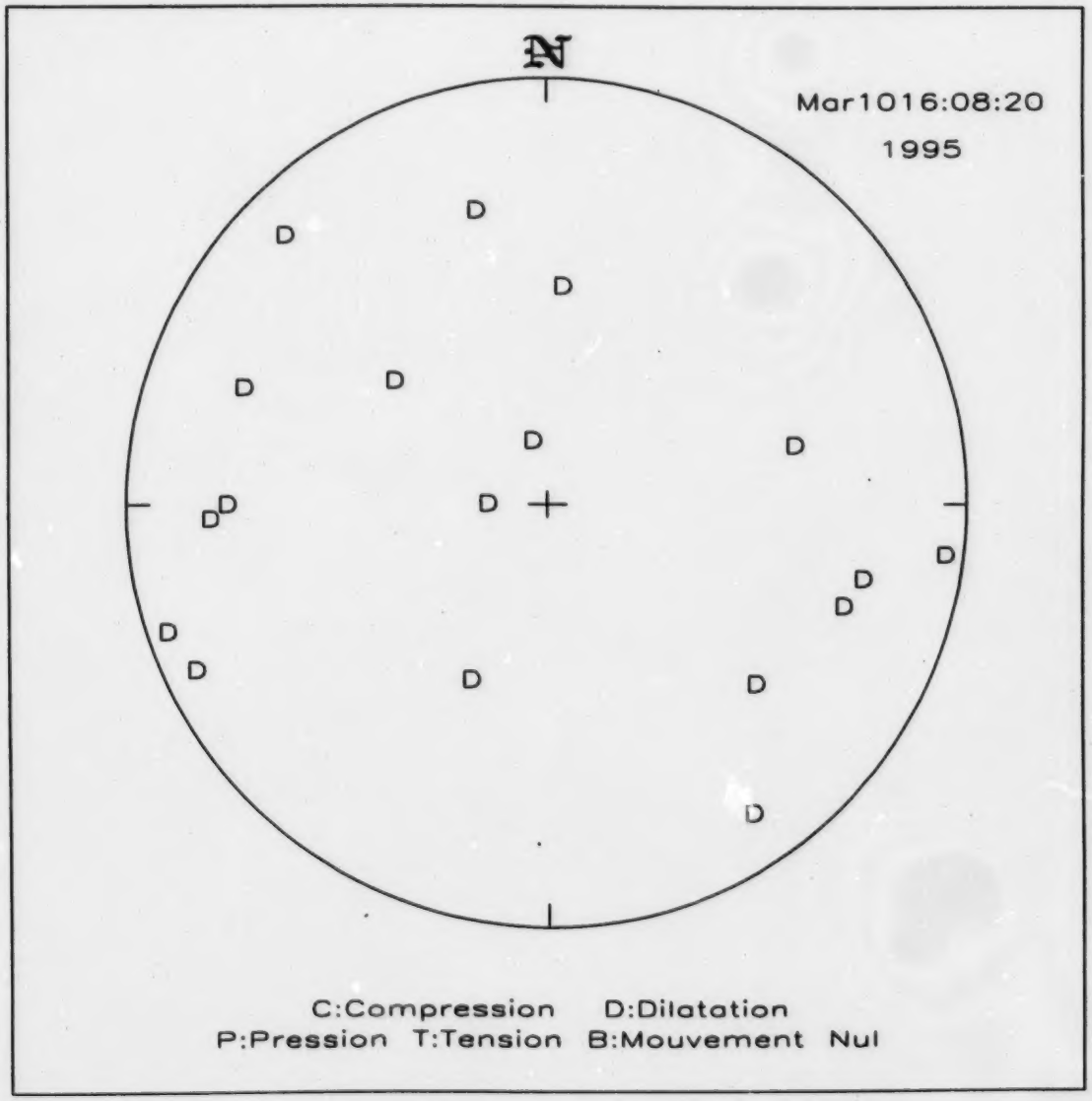

N
Feb0111:08:29
1995
D
D
B
C
D
C
D
C
C
C
C
T
D
D
P
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

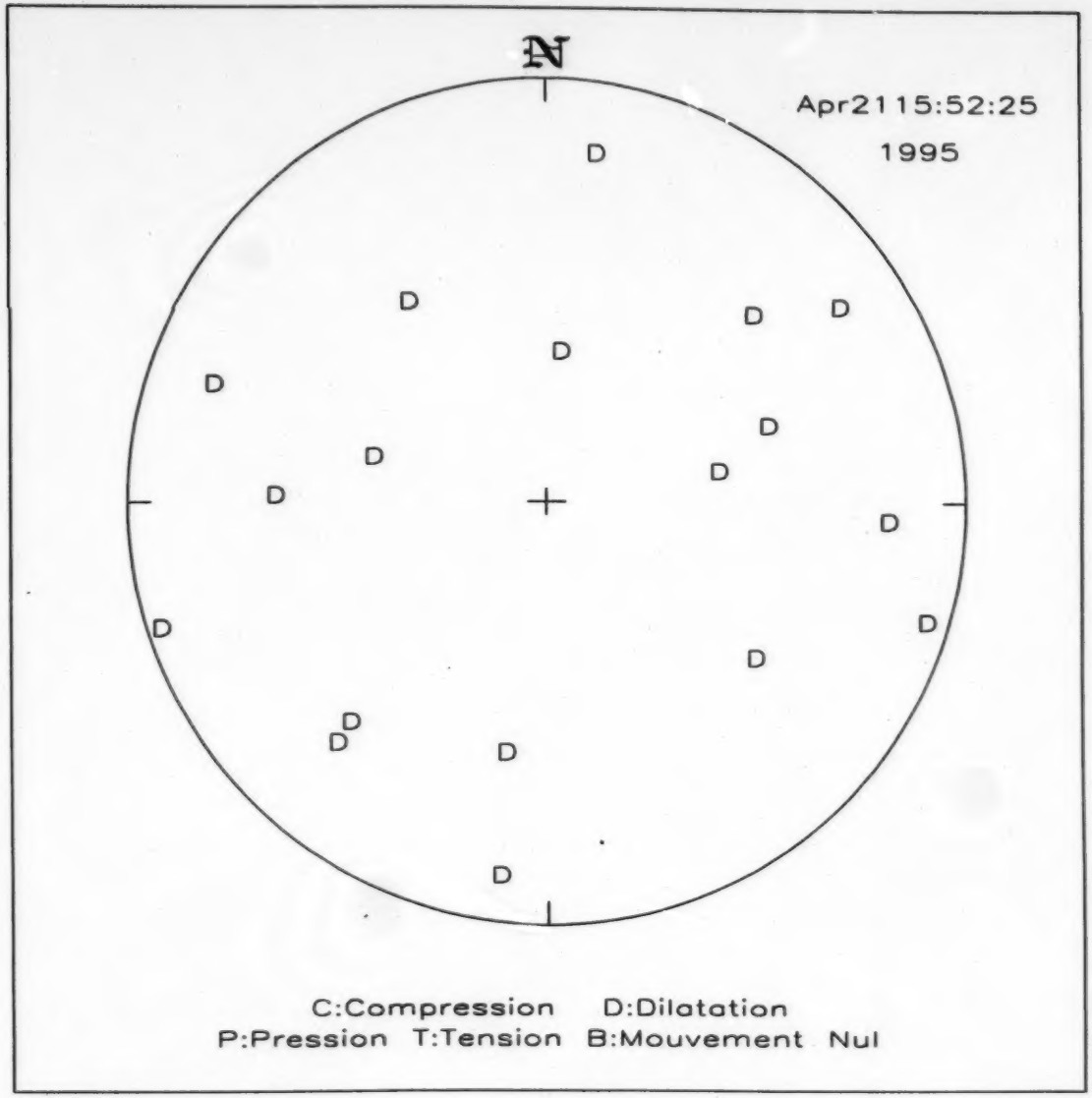

N
Feb1716:02:09
1995
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

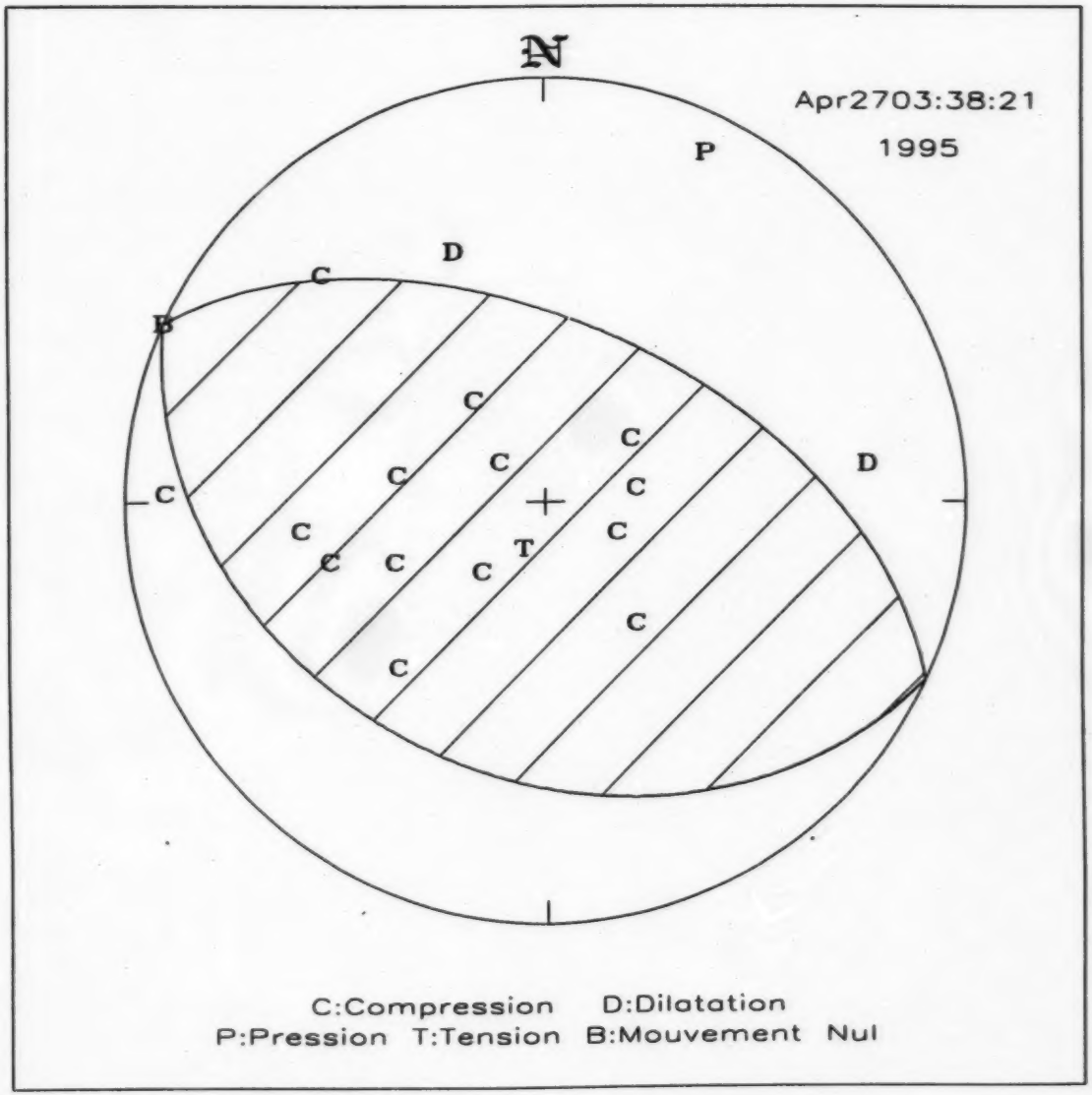

N
Feb2317:24:29
1995
D
D
C
D
D
D
P
D
D
T
D
C
D
D
C
D
C
C
B
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

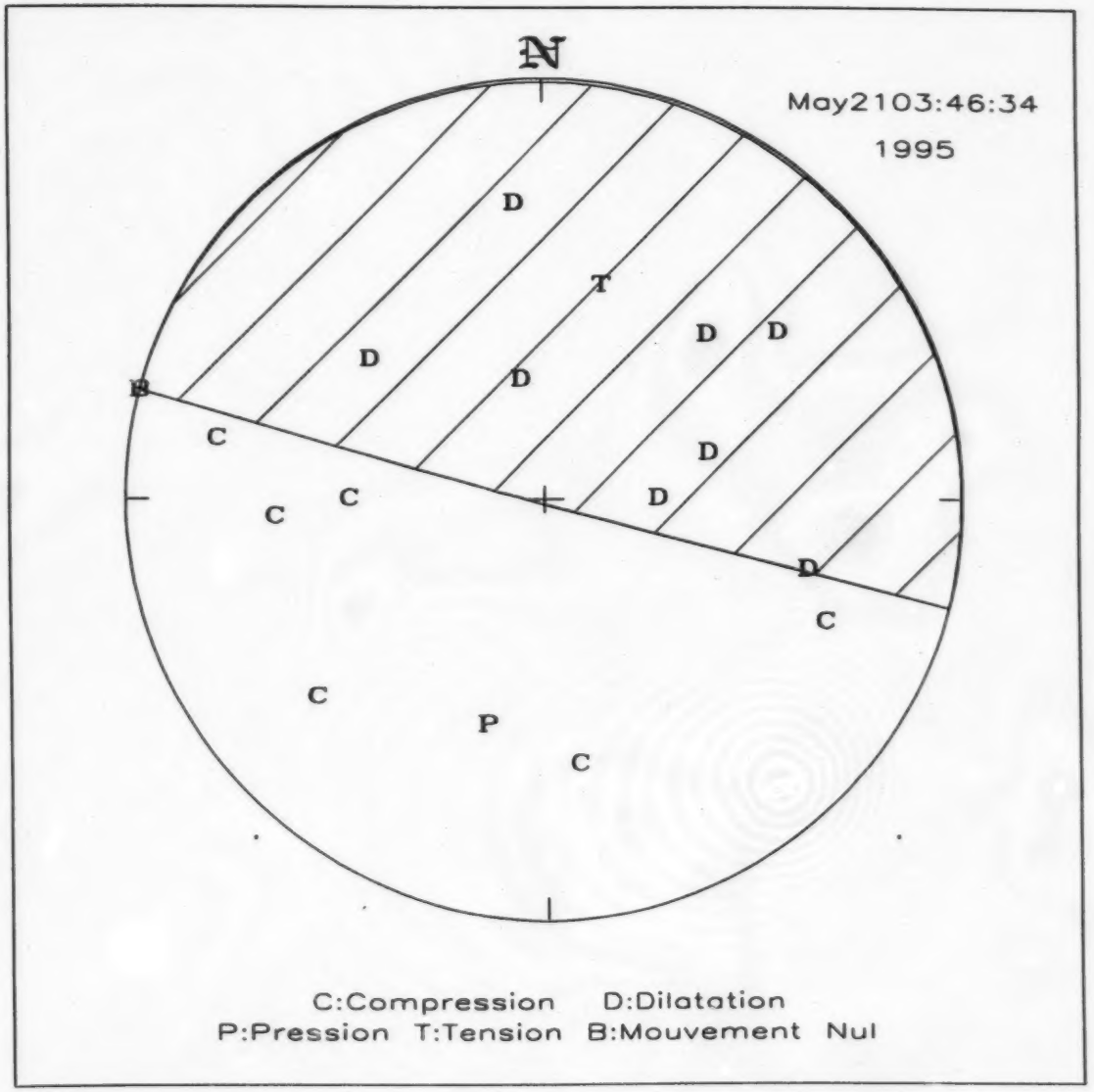

N
P
Mar0818:08:22
1995
D
D
C
C
T
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
B
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

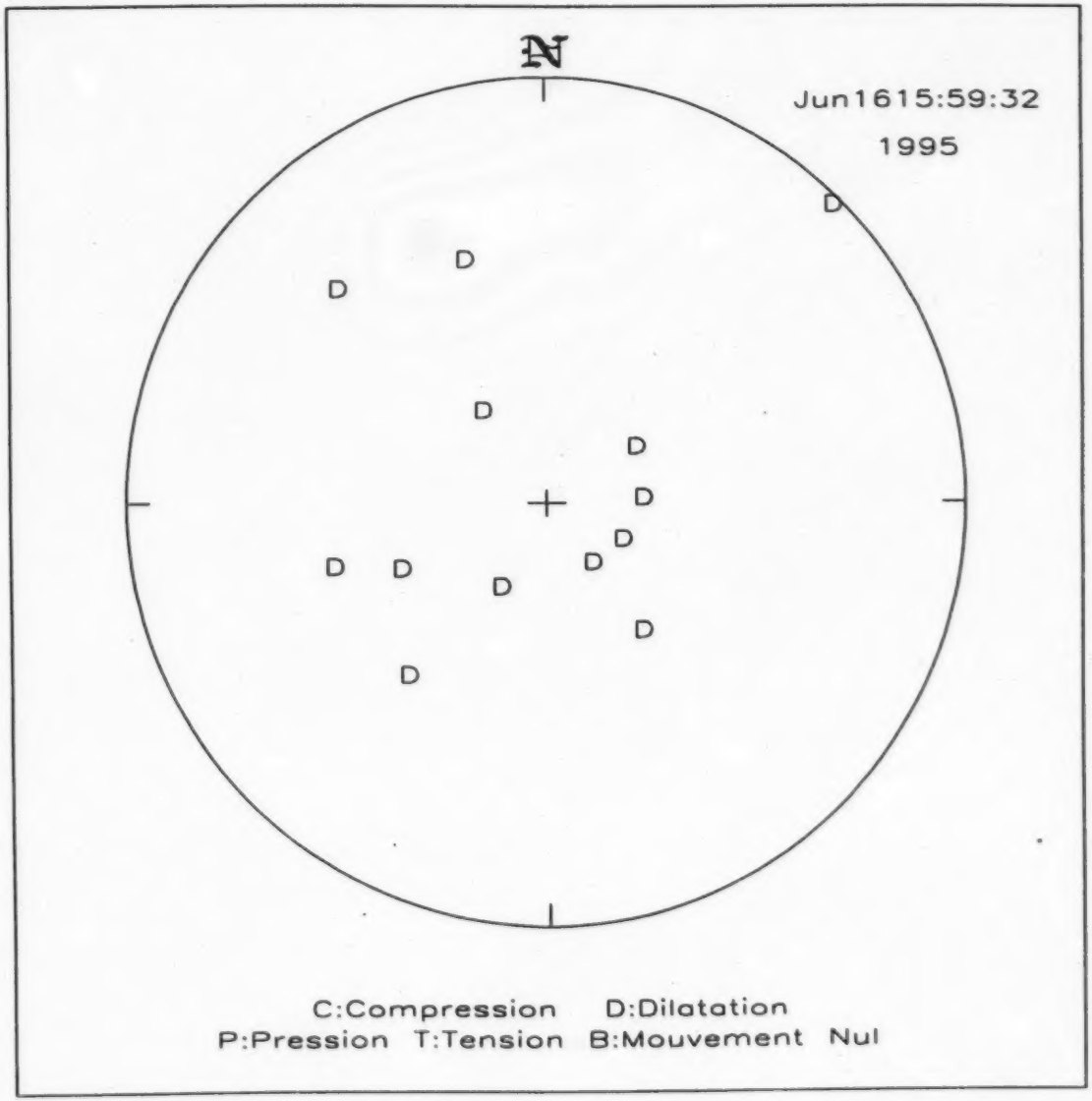

N
Mar0907:15:37
1995
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

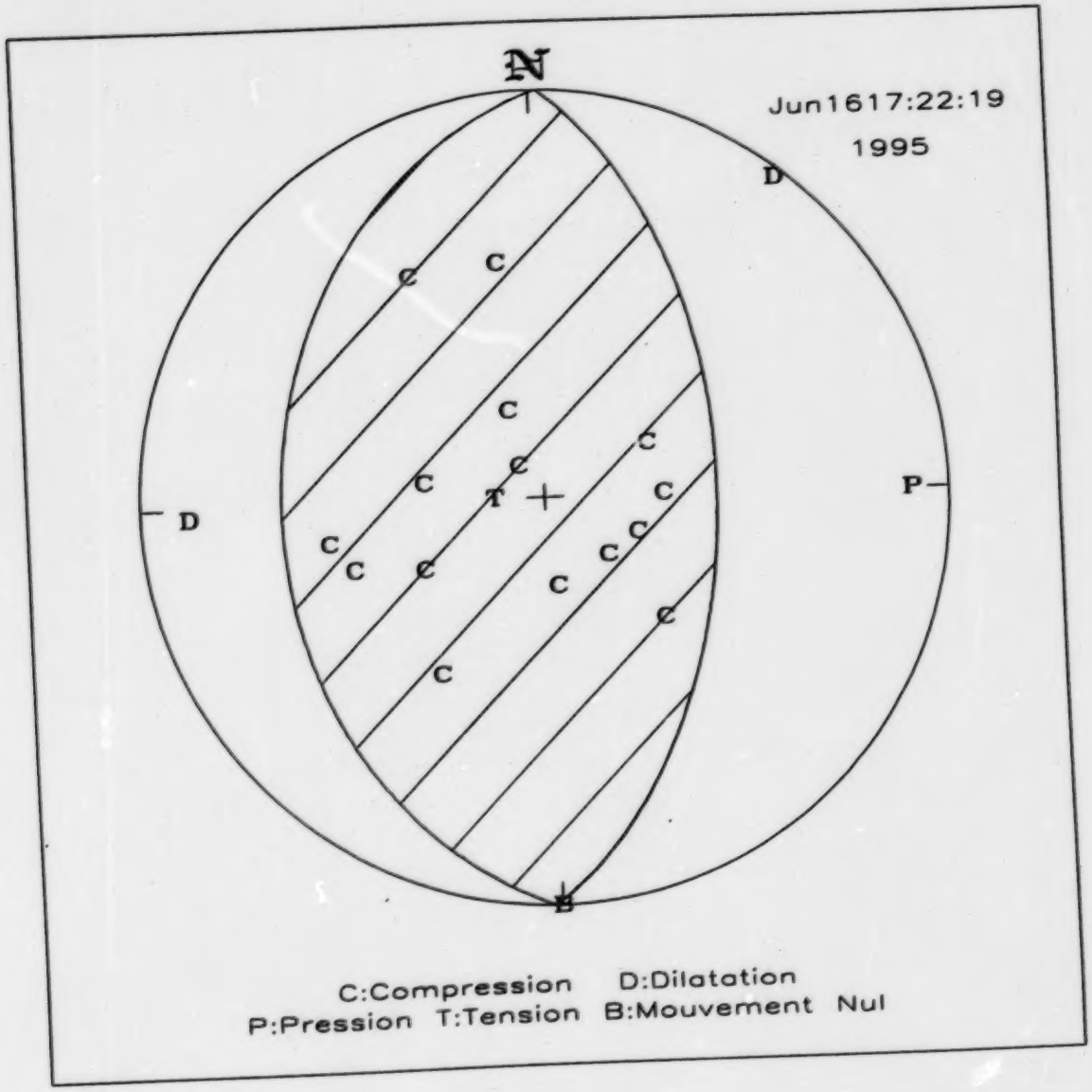

N
Mar1016:08:20
1995
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

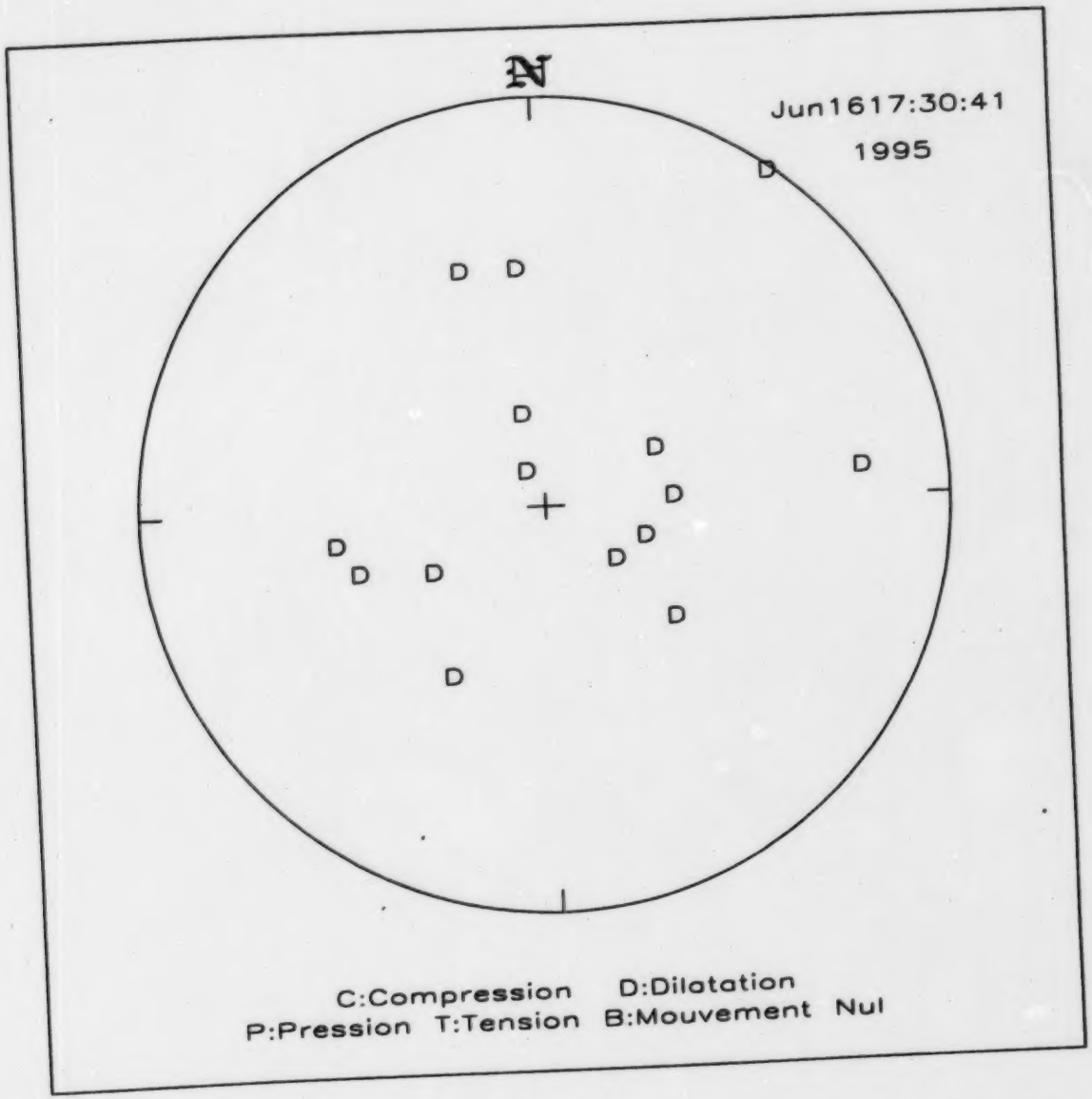

N
Apr2115:52:25
1995
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

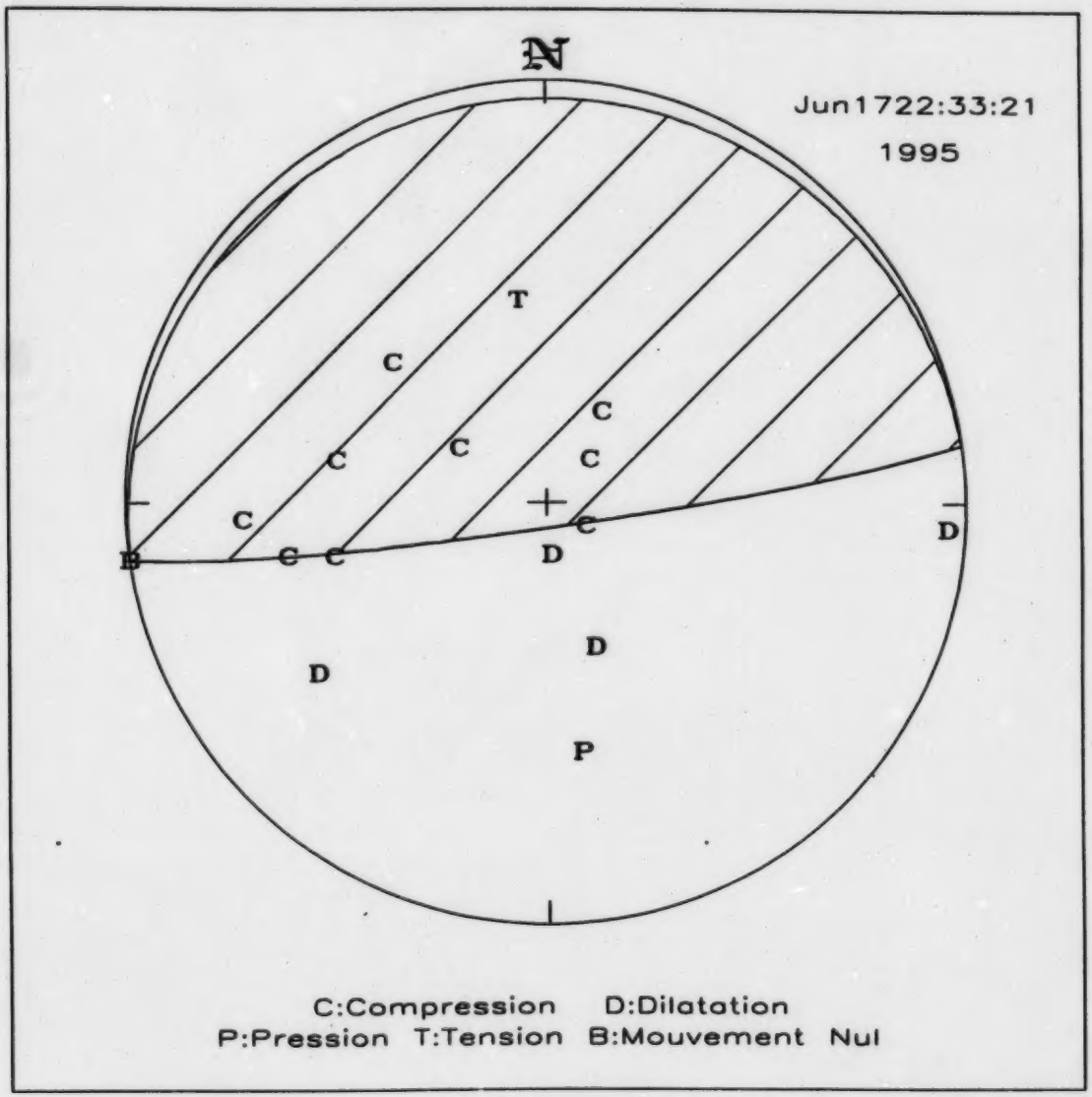

N
Apr2703:38:21
1995
P
D
C
B
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
T
D
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

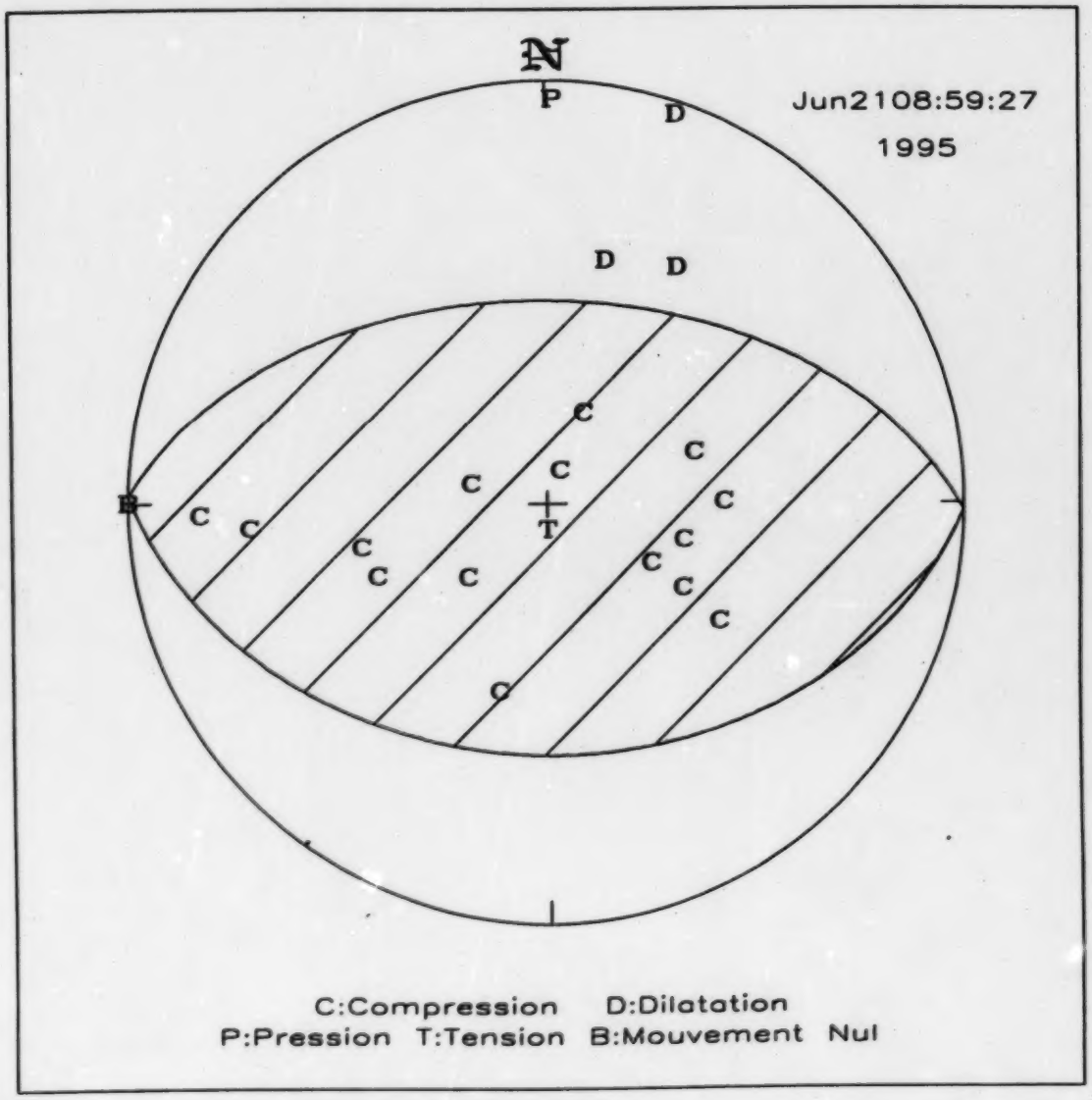

N
May2103:46:34
1995
D
T
D
D
D
D
B
C
C
C
D
D
D
C
C
P
C
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

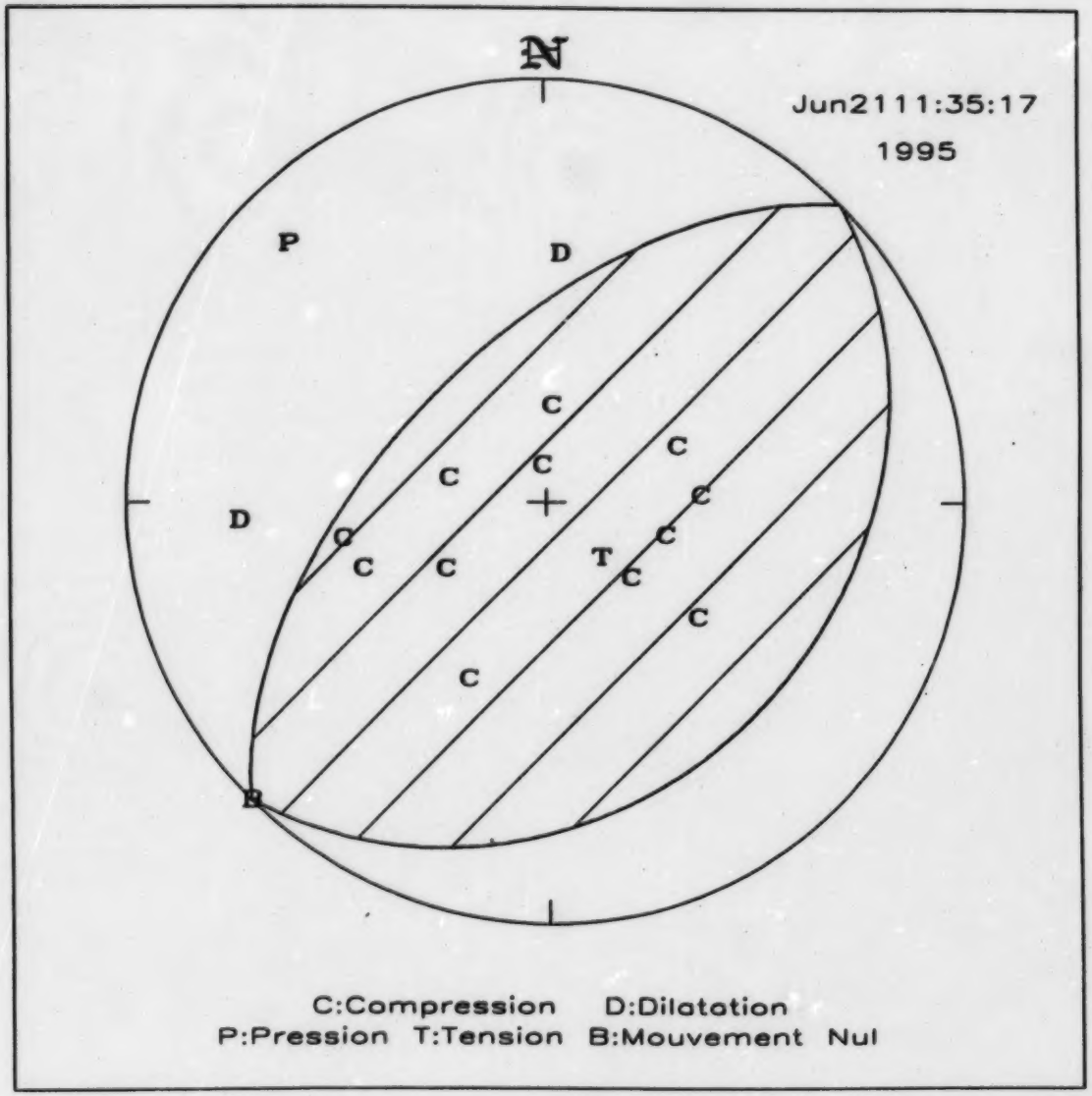

N
Jun1615:59:32
1995
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul

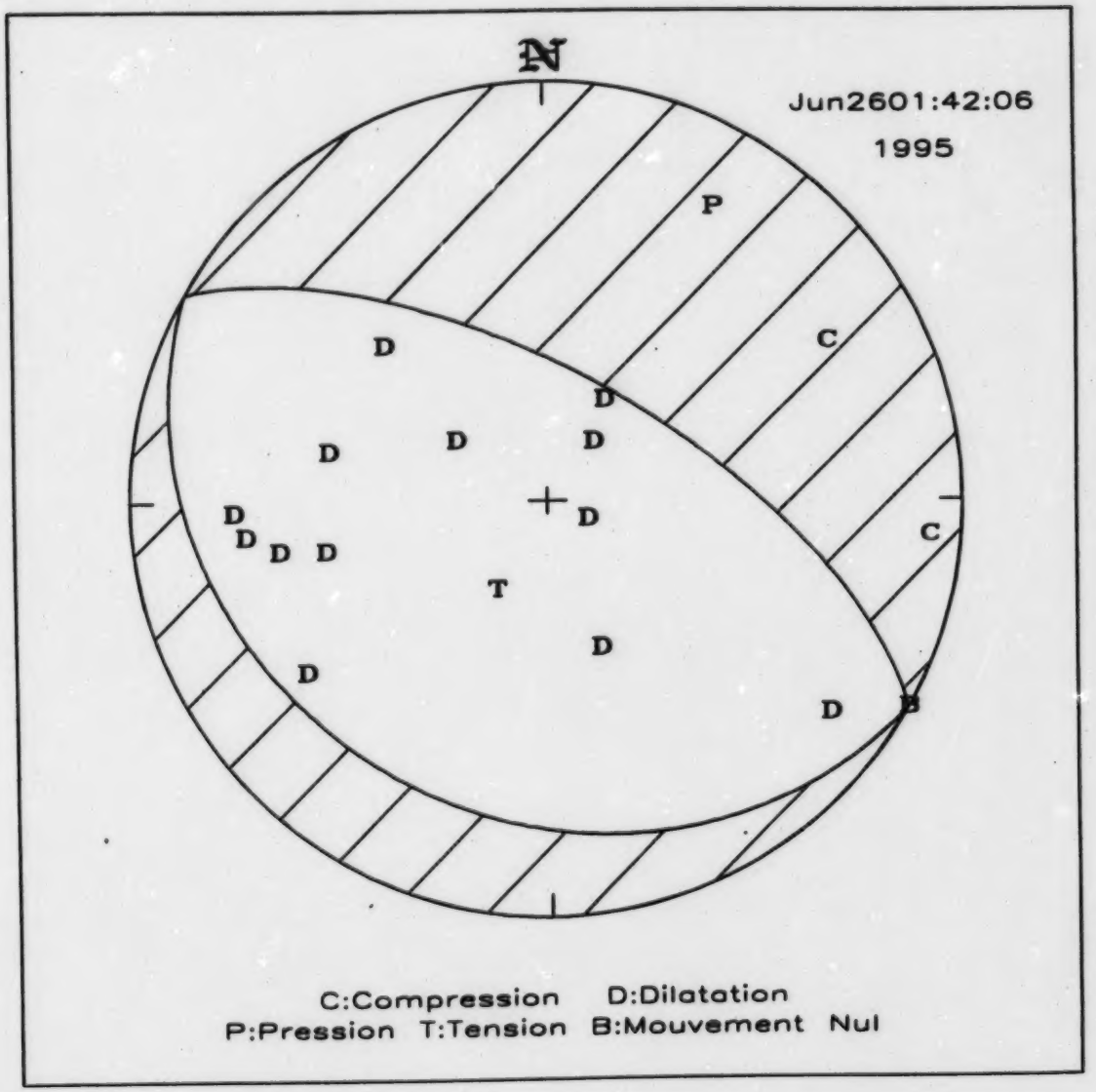

N
Jun1617:22:19
1995
D
P
D
B
C
T
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul


N
Jun1617:30:41
1995
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul


N
Jun1722:33:21
1995
T
C
C
C
C
C
C
C
C
B
D
D
D
D
P
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul


N
P
D
Jun2108:59:27
1995
D
D
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
B
T
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul


N
Jun2111:35:17
1995
P
D
D
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
T
C
C
B
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul


N
Jun2601:42:06
1995
P
C
C
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
D
T
D
D
B
C:Compression D:Dilatation
P:Pression T:Tension B:Mouvement Nul